

ENCYCLOPÉDIE CHIMIQUE

PUBLÉE SOUS LA DIRECTION DE

M. FREMY

Membre de l'Institut, professeur à l'École polytechnique, directeur du Muséum
Membre du Conseil supérieur de l'instruction publique

PAR UNE RÉUNION

D'ANCIENS ÉLÈVES DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE, DE PROFESSEURS ET D'INDUSTRIELS

ET NOTAMMENT DE

- MM. ALFROY, chimiste industriel; AUDOUIN, ing. en chef des travaux chim. à la Compagnie parisienne du gaz
H. BECQUEREL, répétiteur à l'École polytechnique; BERTHELOT, docteur, membre de l'Institut
M. BOURGEOIS, ancien élève de l'École polytechnique, attaché au laboratoire de géologie du Collège de France
BOURGOIN, professeur à l'École de pharmacie; CAMUS, directeur de la Compagnie du gaz
An. CARNOT, directeur des études de l'École des Mines; CHASTAIN, pharmacien en chef de la Pitié;
CLOEZ, exam. de sortie à l'École polytechnique; CLOEZ fils, répét. à l'École polytechnique
CURIE (J.), préparateur du cours de minéralogie à la Sorbonne
DEBIZE, ing. en chef des man. de l'État; DEBRAY, membre de l'Institut; DECAUX, s.-direct. des salines aux Gobelins
DEHERAIN, professeur au Muséum; DITTE, professeur à la Faculté des sciences de Caen
DUQUESNAY, ingénieur des manufactures de l'État; DUCLAUX, professeur à l'Institut agronomique
LUVETTE, dir. des forges de Terre Noire; Du FORCHAND, docteur ès-sciences; GARNIER (JULES), ing. civil des Mines
GAUDIN, ancien élève de l'École polytechnique, professeur de chimie; GIRARD, dir. du laboratoire municipal
GRANDEAU, doyen de la Faculté des sciences de Nancy; JOLY, maître de conférences à l'École normale
L. GRUNER, inspecteur général des mines; HALLER, maître de conférences de chimie organique à la Faculté de Nancy
HENRIVAUX, s.-dir. de la manf. des glaces de St-Gobain; JOANNIS, docteur ès-sciences, agrégé de l'Université
JOULIE, pharmacien en chef de l'hospice Dubois; JUNGFLIECH, professeur à l'École de pharmacie
KOLS, directeur des usines de produits chimiques du Nord
LEMOINE, ing. en chef des ponts-et-chaus.; LEIDIE, pharm. en chef de l'hôpital Necker; LODIN, ing. des Mines
MALLARD, prof. à l'École des Mines; MARGOTTET, prof. à la fac. des sc. de Montpellier
MARGUIN, ancien élève de l'École polytechnique; MOISSAN, Agrégé à l'École de pharmacie
MOUTIER, exam. de sortie à l'École polytechnique; NIVOIT, prof. à l'École des p.-et-ch.; OGIER, doct. ès-sciences
PARST, s.-direct. du labor. municipal; PARMENTIER, s.-direct. du labor. d'enseign. chim. de la Faculté des sciences
PECHINET, direct. des usines de prod. chim. de Midi; RIBAN, direct. du labor. d'ensem. de la Sorbonne
PORTEZ, pharm. en chef de l'hôpital de Lourdes; PRUNIER, prof. à l'École sup. de pharmacie
SARRAU, ingénieur en chef des poudres et salpêtres; SCHLAGDENHAUFFEN, prof. à la Faculté de médecine de Nancy
SCHLÖSSING, m. de l'Institut, prof. au Conserv. des arts et métiers; SOREL, anc. ing. des manufactures de l'État
TERRELL, aide naturaliste au Muséum; TERQUEM, professeur à la Faculté de Lille
URBAIN, répét. à l'École centrale des arts et manufactures; VIEILLE, ingén. des poudres et salpêtres
VILLIERS, chef des travaux pratiques à l'École de pharmacie
VIOLE, prof. à la Faculté des sciences de Lyon, etc.



TOME V. — APPLICATIONS DE CHIMIE INORGANIQUE

2^e SECTION. — **INDUSTRIES CHIMIQUES**

1^{er} fascicule

Par M. DUQUESNAY, INGÉNIEUR DES MANUFACTURES DE L'ÉTAT

Mortiers et Ciments

EC. PH. 11E

7 NOV 83

BIBLIQUE

PARIS

DUNOD, ÉDITEUR

LIBRAIRE DES CORPS NATIONAUX DES PONTS ET CHAUSSÉES, DES CHEMINS DE FER
DES MINES ET DES TÉLÉGRAPHES

49, Quai des Augustins, 49

1883

Droits de traduction et de reproduction réservés.



CALCAIRES, CHAUX, CEMENTS, MORTIERS

Par M. DUQUESNAY

Ingénieur des Manufactures de l'État.

GÉNÉRALITÉS SUR LA CHAUX ET LES CALCAIRES.

Chaux. — La chaux ou protoxyde de calcium (CaO) est d'un usage très répandu dans les arts industriels (tannage des peaux, épuration du gaz d'éclairage, préparation de la soude, fabrication du sucre, des savons, des bougies stéariques, etc.). Son emploi dans les constructions remonte à une époque très ancienne, ainsi qu'en attestent les monuments élevés par les Égyptiens. Enfin, elle fournit encore une précieuse ressource à l'agriculture pour l'amendement des terres argileuses, qu'elle ameublir et rend plus propres à la végétation.

Les différentes analyses qui ont été faites ont assigné à la chaux la composition suivante :

| | |
|-------------------|--------|
| Calcium | 74,42 |
| Oxygène. | 28,58 |
| | <hr/> |
| | 100,00 |

Cette base est blanche, sa densité est égale à 2,5. Quand on la plonge dans l'eau et qu'on l'en retire, après dégagement de l'air contenu dans ses pores, elle s'hydrate en produisant un sifflement accompagné d'épaisses vapeurs d'eau. L'échauffement qui résulte de cette hydratation est susceptible d'élever la température jusqu'à 500°.

La chaux qui s'est *délitée*, c'est-à-dire qui s'est réduite en poudre en absorbant de l'eau, constitue un monohydrate CaO, HO , auquel on donne souvent le nom de *chaux éteinte*, pour la distinguer de la *chaux vive*, qui est la chaux anhydre (CaO).

La chaux éteinte, à l'état de poudre impalpable en suspension dans l'eau, constitue le *lait de chaux*.

La chaux est peu soluble dans l'eau pure, et son degré de solubilité diminue quand la température s'élève.

Dalton avait donné comme solubilité de la chaux dans l'eau :

- à 15°, 6 : 1 partie de chaux dans 778 d'eau ;
 Soit, 1,285 de chaux dans 1000 d'eau ;
 à 100° : 1 partie de chaux dans 1270 d'eau ;
 Soit, 0,785 de chaux dans 1000 d'eau.

Richards Philipps donne comme solubilité de la chaux :

- à 0° : 1 partie de chaux dans 650 d'eau ;
 Soit, 1,574 de chaux pour 1000 d'eau.

Le coefficient de solubilité à 0° serait ainsi environ le double du coefficient donné par Dalton à 100°.

D'après M. Lamy¹, cette solubilité est représentée, pour 1000 parties d'eau, par les chiffres suivants, selon la provenance de la chaux :

| TEMPÉRATURES. | Chaux de nitrate. | Chaux de marbre. | Chaux déshydratée ou recuite au rouge. |
|---------------|-------------------|------------------|--|
| 0°..... | 1,562 | 1,581 | 1,450 |
| 10°..... | 1,511 | 1,542 | 1,384 |
| 15°..... | 1,277 | 1,299 | 1,348 |
| 30°..... | 1,142 | 1,102 | 1,195 |
| 45°..... | 0,996 | 1,005 | 1,053 |
| 60°..... | 0,844 | 0,864 | 0,885 |
| 100°..... | 0,562 | 0,576 | 0,584 |

Ces chiffres, ainsi que les nombreuses expériences faites par M. Lamy, démontrent que la solubilité de la chaux est un peu différente suivant son origine et son état d'aggrégation, mais que la loi de variation avec les températures est la même dans tous les cas.

La chaux est presque complètement insoluble dans une liqueur qui contient de la potasse ou de la soude libre. Quand on fait bouillir une dissolution de potasse avec de la chaux en excès, la liqueur retient moins de 1/50000 de chaux. Si l'on ajoute de la potasse ou de la soude dans de l'eau de chaux, on obtient un abondant précipité de chaux hydratée. Mais la chaux se dissout en quantité très notable dans l'ammoniaque.

Le sucre se combine avec la chaux et forme un composé soluble dans l'eau. Cette dissolution, que l'on nomme saccharate de chaux, se prend en masse par l'action de la chaleur et redevient liquide par le refroidissement.

La chaux, à l'état anhydre ou à l'état hydraté, absorbe l'acide carbonique de l'air et produit du carbonate de chaux; en se carbonatant, elle prend la dureté de certaines pierres, dites *pierres à chaux*, employées dans l'industrie pour sa fabrication.

C'est cette propriété importante qui fait employer la chaux dans la confection

1. Comptes rendus à l'Académie des sciences, 1878

des mortiers. C'est aussi en raison de cette affinité qu'on ne la rencontre jamais dans la nature à l'état de liberté.

La chaux, combinée avec l'acide carbonique, constitue, à l'état naturel, les variétés de calcaire connues sous les noms de *spath d'Islande*, *aragonite*, *marbre*, *craie*, etc. Unie à l'acide sulfurique, elle constitue le *plâtre* ou *gypse*. On la trouve, en outre, combinée en différentes proportions avec la silice; elle entre dans la composition des os des animaux à l'état de phosphate et de carbonate. Les coquilles des mollusques sont presque entièrement formées de carbonate de chaux; enfin la plupart des végétaux contiennent de la chaux unie à des acides organiques.

Du carbonate de chaux. — La chaux se prépare industriellement au moyen du carbonate de chaux qui, porté à la température rouge, se décompose en acide carbonique et en chaux.

Le carbonate de chaux pur (CaO, CO_2) est parfaitement blanc et a pour composition :

| | |
|---------------------------|-------|
| Chaux. | 56,00 |
| Acide carbonique. | 44,00 |
| | <hr/> |
| | 100 » |

Sa dureté, à l'état naturel, présente des différences très notables d'une variété à une autre. Chauffé en vase clos sous une forte pression, le carbonate de chaux, au lieu de se décomposer, entre en fusion et présente, après un refroidissement lent, tous les caractères du marbre. Cette expérience, due à Hall, explique la présence du marbre dans les terrains d'origine ignée.

Le carbonate de chaux est insoluble dans l'eau, mais il entre en dissolution dans une eau chargée d'acide carbonique en se transformant en bicarbonate de chaux. Une eau saturée d'acide carbonique peut dissoudre, à 0°, 0,00070 de son poids de carbonate de chaux et 0,00088 à 10°. Mais le bicarbonate de chaux, dissous dans l'eau, abandonne facilement à l'air une partie de son acide carbonique et produit des dépôts calcaires qui donnent naissance à des phénomènes naturels bien connus, tels que incrustations, pétrifications, stalactites et stalagmites, etc.

Le carbonate de chaux est très répandu dans la nature. On le rencontre dans tous les terrains, depuis les plus anciens jusqu'aux plus modernes, mais principalement dans les terrains secondaires et tertiaires. Il constitue des chaînes de montagnes entières, telles que les Pyrénées, le Jura, les Vosges, les Apennins, une grande partie des Alpes, etc., et offre un grand nombre de variétés.

Parmi elles, on distingue deux variétés nettement caractérisées par des formes cristallines différentes :

L'une est le *spath d'Islande*, composé de cristaux qui, par leur forme (rhomboèdre oblique), appartiennent au troisième système cristallin. Ces cristaux sont incolores et transparents, ils présentent le phénomène de la double réfraction.

L'autre est l'*aragonite*, qui cristallise en prismes droits rhomboïdaux et correspond au quatrième système cristallin.

Ces deux variétés se rencontrent dans la nature à un grand état de pureté, mais n'ont aucune importance industrielle.

Le *calcaire saccharoïde*, ainsi nommé à cause de l'analogie de sa cassure avec celle du sucre, est formé de petits cristaux blancs de grosseur extrêmement variable. Cette variété fournit les marbres statuaire. Elle présente, quelquefois, le passage à la texture lamelleuse, comme dans le marbre de *Paros*; mais, le plus ordinairement, elle est massive, dure et susceptible d'être polie. L'espèce la plus estimée est le marbre de *Carrare*, à cause de son grain fin et homogène. D'autres espèces sont légèrement colorées; tels sont : le bleu turquin, coloré en gris bleuâtre par des traces de bitume; le marbre jaune antique, coloré par une petite quantité d'hydrate de peroxyde de fer.

Le *calcaire compact* est une variété de carbonate de chaux très répandue dans diverses formations géologiques, mais principalement dans les terrains primaires. Ce calcaire a une cassure mate et se trouve, dans la plupart des cas, mélangé à des matières étrangères, telles que : bitume, argile, silice, matières organiques, oxydes métalliques auxquels sont dues les couleurs variées sous lesquelles il se rencontre dans la nature. Certaines espèces ont un grain très fin et sont susceptibles de poli; nous citerons, par exemple : le marbre *noir antique*; le marbre *Sainte-Anne*, qui présente des veines blanches sur un fond noir ou d'un gris très foncé; le marbre *griotte*, dont le fond brun est parsemé de taches rouges; le marbre du *Languedoc* ou marbre incarnat, etc.

L'*albâtre calcaire* ou *albâtre antique* est une variété fibreuse formée par voie aqueuse et stalactiforme.

On désigne sous le nom de *calcaire oolithique* un calcaire formé de petits grains arrondis de la grosseur d'un œuf de poisson. Ces grains résultent de la formation de concrétions de carbonate de chaux autour de particules solides, grains de sable ou fragments de coquilles; ils sont réunis et cimentés par un précipité calcaire; ces roches se rencontrent principalement à l'étage moyen du terrain jurassique.

La *craie* ou *calcaire terreux* appartient surtout aux terrains crétacés et aux terrains tertiaires; elle est parfois jaunâtre, mais le plus souvent d'un blanc très pur; elle est tendre, douce au toucher et composée de deux parties distinctes, quoique toutes deux calcaires : l'une constituée par des grains amorphes de carbonate de chaux précipité par suite de l'évaporation; l'autre formée de coquilles microscopiques ayant appartenu à de petits animaux de la classe des Rhizopodes.

La *craie tuffau* est un calcaire à cassure inégale, d'une texture terreuse, rude au toucher et d'une couleur jaunâtre; il est, en général, assez résistant pour être utilisé comme pierre à bâtir.

Le *calcaire grossier* renferme du sable et de l'argile, il se rencontre principalement dans les terrains tertiaires et entre dans un très grand nombre de constructions.

Dans les terrains d'alluvion, on trouve le *tuf* ou calcaire cellulaire, résultat d'incrustations calcaires sur des matières d'origine organique, dont les débris sont encore visibles.

La *dolomie* est un carbonate double de chaux et de magnésie formé de 54 parties de carbonate de chaux et de 46 parties de carbonate de magnésie. A l'état naturel, elle est presque toujours mélangée à un des deux carbonates constitutifs, et forme ce que l'on appelle les calcaires dolomitiques. Ces calcaires contiennent par conséquent des proportions de magnésie très variables; la présence de cette base diminue

la solubilité dans les acides en augmentant la dureté et la densité. A la cuisson, ces calcaires fournissent des chaux essentiellement différentes de celles que donnent les calcaires précédents.

Les *marnes* sont des mélanges intimes, en toutes proportions, de calcaire et d'argile. Suivant que la proportion de calcaire est supérieure ou inférieure à celle de l'argile, les marnes sont dites calcaires ou argileuses; ces dernières ne sont guère utilisées que pour la fabrication des poteries.

Dans les marnes calcaires, l'argile se trouve si bien disséminée dans la masse qu'il n'est pas possible de la distinguer à l'œil; mais, à mesure que la proportion d'argile augmente, la nature du mélange se modifie d'une manière très sensible; la dureté et la résistance deviennent de plus en plus faibles; la matière prend un aspect terreux et exhale nettement l'odeur de l'argile.

Nous verrons plus loin l'usage que l'on fait des marnes calcaires pour la fabrication des chaux hydrauliques.

Les *calcaires bitumineux* sont des calcaires qui renferment une certaine quantité de bitume et doivent à la présence de cette matière leur coloration grise ou bleue plus ou moins foncée.

Lorsque la proportion de bitume atteint 6 à 10 pour 100, ces calcaires constituent ce que l'on appelle l'asphalte, qui est d'un emploi très répandu depuis quelques années, pour la confection des dallages.

ANALYSE DES CALCAIRES.

1^{re} Analyse succincte.

A. *Calcaire employé comme pierre de construction.* — Lorsque les calcaires sont employés comme pierres de taille ou comme moellons dans les constructions, les caractères physiques, la dureté et la résistance à l'écrasement, ont plus d'importance pour l'architecte que les caractères chimiques; cependant il peut y avoir un certain intérêt à faire des analyses de pierres éprouvées par l'usage et à en comparer les résultats avec ceux que donne l'examen des caractères physiques. Ces analyses peuvent être très succinctes, car les éléments dont il importe principalement de connaître la proportion sont : le sable, l'argile, l'oxyde de fer, la chaux et la magnésie. On opère ordinairement de la manière suivante : On attaque 3 ou 4 grammes du calcaire par l'acide nitrique étendu; la partie insoluble, recueillie sur un filtre, est lavée, séchée, calcinée et pesée; elle est composée de parties argileuses et sableuses que l'on peut séparer par lévigation. La dissolution dans l'acide nitrique est évaporée à sec et chauffée jusqu'à 180° environ; le résidu, traité à 100° par quelques gouttes d'une dissolution concentrée de nitrate d'ammoniaque, est repris par l'eau qui le dissout, à l'exception du peroxyde de fer et d'une très faible quantité d'alumine primitivement dissoute par l'acide nitrique; on se borne généralement à peser ensemble ces deux corps sans chercher à les séparer. La dissolution est ensuite traitée successivement par l'oxalate d'ammoniaque, puis par le phosphate de soude, de manière à obtenir les proportions de chaux et de magnésie.

Nous donnons, ci-dessous, quelques résultats d'analyses faites au laboratoire des

Ponts et chaussées, sous la direction de M. Léon Durand-Claye, sur des échantillons de pierres calcaires réunis à l'occasion de l'Exposition universelle de 1878, et provenant de différents étages géologiques.

| DÉSIGNATION DES MATÉRIAUX. | ÉTAGE géologique. | RÉSIDU insoluble dans les acides. | | MATIÈRES SOLUBLES dans les acides. | | | Perte au feu et produits non dosés. |
|--|-------------------------------------|---|------------------------|---------------------------------------|--------|-----------|--|
| | | Parties sableuses. | Parties argileuses. | Alumine et peroxyde de fer. | Chaux. | Magnésie. | |
| Pierre de Villefranche (Pyrénées-Orientales). | Dévonien | 0,65 | 2,15 | 0,40 | 55,40 | 0,45 | 42,95 |
| Pierre de Marbaix (Nord). | Carbonifère | 0,40 | 1,55 | 0,25 | 55,10 | 0,95 | 45,55 |
| Pierre de Valognes (Manche). | Jurassique infra-lias. | 0,15 | 0,35 | 1,55 | 54,10 | 0,05 | 45,70 |
| Pierre de Lienesse (Cher). | Lias | 0,15 | 1,95 | 0,55 | 52,55 | 0,70 | 44,10 |
| Pierre de Lussac (Vienne). | Bajocien | 0,05 | 0,50 | 0,60 | 54,00 | 0,45 | 44,60 |
| Pierre de Comblanchien (Côte-d'Or). | Grand oolitite | traces. | 0,65 | 0,40 | 55,00 | 0,45 | 45,50 |
| Pierre de Crussol (Ardèche). | Oxfordien | » | 1,20 | 0,05 | 54,45 | 0,55 | 45,55 |
| Pierre d'Euville (Meuse). | Coralien | 0,10 | 0,20 | 0,25 | 54,90 | 0,50 | 44,25 |
| Pierre de Montmerle (Ain). | Kimmeridje | 0,50 | 1,20 | 1,00 | 51,85 | 1,70 | 45,95 |
| Pierre de Savonnières (Meuse). | Portlandien | 0,10 | 0,35 | 0,45 | 54,80 | 0,50 | 44,00 |
| Pierre de Cassis (Bouches-du-Rhône). | Crétacé Néocomien. | 0,15 | 0,10 | 0,50 | 53,45 | 0,45 | 45,55 |
| Pierre de Saint-Savinien (Charente-Inférieure). | Craie glauconieuse | 2,25 | 0,15 | 0,25 | 54,50 | 0,10 | 42,95 |
| Pierre d'Angoulême (Charente). | Craie marneuse | 0,05 | 0,05 | 0,45 | 54,90 | 0,50 | 44,25 |
| Pierre de Vernon (Eure). | Craie blanche | 0,95 | 1,15 | 0,85 | 55,85 | 0,15 | 45,05 |
| Liais de Bagneux (Seine). | Éocène | 2 » | 1,10 | 0,40 | 52,95 | 0,55 | 45,00 |
| Pierre de Berchères (Eure-et-Loir). | Oligocène | 0,05 | 0,10 | 0,25 | 54,85 | 0,65 | 44,10 |
| Pierre de Montpaon (Bouches-du-Rhône). | Miocène supérieur | 0,05 | 0,15 | 0,55 | 55,25 | 0,50 | 45,90 |
| Tuf de Creissels (Aveyron). | Moderne | 0,10 | 0,65 | 0,20 | 54,00 | 0,80 | 44,25 |

Ce tableau montre que les mêmes matières se trouvent unies au carbonate de chaux dans tous les calcaires, quelle que soit la formation géologique à laquelle ils appartiennent.

Toute pierre gélive, c'est-à-dire qui jouit de la propriété fâcheuse de se fendre par les gelées, doit être rejetée comme pierre de construction. Pour reconnaître si une pierre est gélive, on prépare une dissolution de sulfate de soude saturée à froid que l'on porte à l'ébullition; on y plonge à ce moment la pierre à essayer, et on l'y maintient pendant une demi-heure. On la retire et on la laisse

égoutter; le sel cristallise par refroidissement et exerce une action analogue à celle de la gelée. Si la pierre est gélive, il s'en détache de petits éclats au bout d'un temps plus ou moins long. On recommence chaque jour l'opération, et on admet que toute pierre qui est restée intacte après vingt jours d'épreuve est excellente. Celles qui n'ont pas résisté ne sont pas nécessairement mauvaises, mais elles ne doivent être employées qu'après avoir séjourné quelque temps à l'air libre.

B. Calcaire employé pour la fabrication de la chaux. — Lorsqu'il s'agit de déterminer la nature de la chaux que peut fournir un calcaire par une cuisson convenable, il suffit de traiter 4 à 5 grammes de ce calcaire par l'acide nitrique étendu; le résidu insoluble est jeté sur un filtre et pesé après avoir été bien lavé, séché et calciné. Si, d'après le poids de ce résidu, et l'aspect qu'il présente à la loupe, on reconnaît que le calcaire ne renferme pas au moins 8 pour 100 de sable fin et d'argile, on peut être assuré qu'il n'est pas susceptible de fournir, par la cuisson directe, du ciment ou de la chaux hydraulique.

Dans ce dernier cas, pour reconnaître si le calcaire fournira de la chaux grasse ou de la chaux maigre, on recherche dans la dissolution nitrique, par le procédé indiqué précédemment, les proportions d'oxyde de fer et de magnésie et on compare les résultats obtenus à ceux que donnent divers calcaires à chaux plus ou moins maigres dont les qualités sont connues.

Lorsque la proportion de sable fin et d'argile est supérieure à 8 pour 100, le calcaire peut être susceptible de fournir de la chaux hydraulique et, pour préjuger de la qualité de cette chaux, il convient de faire une analyse complète du calcaire.

2° Analyse complète.

A. Calcaire non bitumineux. — Supposons d'abord que l'on opère sur un échantillon de calcaire non bitumineux. Il y aura à déterminer : l'eau hygrométrique ou combinée, l'acide carbonique, l'acide sulfurique, le sable, l'argile insoluble dans les acides et, dans la dissolution acide, la chaux, la magnésie, le fer, l'alumine, le manganèse.

Dosage de l'acide carbonique et de l'eau. — L'eau et l'acide carbonique s'évaluent ensemble par la perte de poids résultant d'une calcination au rouge vif sous le moufle d'un four à coupelle.

Pour doser l'acide carbonique isolément, on introduit un poids déterminé du calcaire dans un flacon *a* (figure 1) fermé par un bouchon traversé par deux tubes. L'un d'eux, *b*, est rempli de chlorure de calcium et se termine par une partie effilée, l'autre *c*, qui a la forme d'une pipette, est rempli d'acide nitrique et fermé à son extrémité par une boule de cire molle. On pèse l'ensemble de cet appareil, puis on enlève la boule



Fig. 1.

de cire, et l'acide, découlant dans le flacon, vient agir sur le calcaire. On relie alors le tube *c* avec un tube à chlorure de calcium et on détermine une légère aspiration par l'extrémité effilée du tube *b*. On agite, à plusieurs reprises, le flacon et on le chauffe même au bain-marie pour faciliter le dégagement de l'acide carbonique. Quand la décomposition est complète, on enlève le tube à chlorure de calcium que l'on avait adapté momentanément au tube *c*, afin de n'admettre dans le flacon que de l'air parfaitement sec; on remet la boule de cire et on pèse de nouveau tout l'appareil. La perte de poids constatée est exclusivement due au dégagement de l'acide carbonique, puisque l'eau a été retenue, à sa sortie du flacon, par le tube à chlorure de calcium.

Dosage du sulfate de chaux. — Le sulfate de chaux se trouve ordinairement en proportion très faible dans les calcaires; pour le doser, on prend un échantillon du poids de 15 à 20 grammes qu'on réduit en poudre impalpable et qu'on soumet pendant plusieurs jours à l'action de l'eau distillée, en ayant soin d'agiter fréquemment. On décante ensuite et l'on recommence l'opération en renouvelant l'eau. Les deux liquides obtenus par décantation et par filtration sont évaporés séparément; dans le cas où le second laisse un résidu appréciable, on n'est pas certain d'avoir dissous la totalité du sulfate de chaux; il faut alors traiter une troisième fois la matière par l'eau et réunir ensuite ensemble les résidus de l'évaporation des différents liquides.

Après avoir pesé ces résidus, on les redissout pour doser l'acide sulfurique et la chaux. Si les nombres que l'on obtient ainsi ne correspondent pas à la composition du sulfate de chaux, il est à présumer que le calcaire renferme des sels alcalins dont il est, d'ailleurs, assez inutile de rechercher les proportions, attendu qu'ils ne peuvent exercer aucune influence sur la qualité de la chaux hydraulique.

Dosage du sable, de l'argile, de la chaux, de la magnésie, du fer, du manganèse et de l'alumine. — Dans le cas où l'opération précédente n'indique que des traces de sulfate de chaux, on les néglige et on fait l'analyse sur le calcaire lui-même; dans le cas contraire, on opère sur une partie de la matière qui a été préalablement traitée par l'eau et qui est, par conséquent, débarrassée du sulfate de chaux et des sels alcalins.

On prend 3 grammes de la matière à analyser et on la traite par l'acide nitrique étendu et en excès, en chauffant légèrement pour accélérer l'attaque. Le résidu insoluble dans la liqueur acide, que l'on lave avec soin sur un filtre, est composé d'argile et de sable; on sépare, par lévigation, le gros sable du sable fin et de l'argile. Ces deux derniers éléments paraissent seuls susceptibles de se combiner avec la chaux, pendant la cuisson. L'action du sable en gros grains, sans être nulle, est certainement beaucoup moins prononcée, et comme il n'est pas possible de prévoir dans quelle mesure elle se produira, Rivot croit qu'il est préférable de ne pas en tenir compte dans la comparaison des calcaires à chaux hydrauliques. On peut encore rechercher les proportions de silice et d'alumine que renferme le mélange de sable fin et d'argile; à cet effet, on fond cette matière avec 4 parties de carbonate de soude dans un creuset de platine, puis on la traite par l'acide chlorhydrique qui laisse la silice insoluble, laquelle est lavée, séchée et pesée.

La dissolution nitrique peut contenir de la chaux, de la magnésie, du fer, du manganèse ainsi qu'une partie de l'argile attaquée par l'acide.

Après avoir évaporé la liqueur à sec, on chauffe le résidu à une température de 180° pour opérer la décomposition des nitrates de fer, d'alumine et de manganèse ; on ajoute quelques gouttes de nitrate d'ammoniaque concentré, puis on reprend par l'eau qui laisse, comme résidu insoluble, du sesquioxyde de fer, de l'alumine et du bioxyde de manganèse, et qui retient en dissolution les nitrates de chaux et de magnésic.

Dans cette dissolution, on précipite la chaux, à l'état d'oxalate, en ajoutant une dissolution concentrée d'oxalate d'ammoniaque. Le précipité d'oxalate de chaux, recueilli sur un filtre, est séché, puis calciné dans un creuset de platine, de manière à réduire l'oxalate à l'état de chaux vive que l'on pèse aussi rapidement que possible.

On verse ensuite, dans la liqueur, du phosphate de soude et on laisse reposer pendant 12 heures environ. Il se dépose du phosphate ammoniaco-magnésien, à l'état de petits cristaux que l'on lave sur un filtre et que l'on pèse après calcination. D'après sa formule, ce phosphate contient 40/111 de son poids de magnésic.

Pour doser le fer, le manganèse et l'alumine, primitivement dissous dans la liqueur acide, on traite le résidu obtenu précédemment par une petite quantité d'acide nitrique et on le fait digérer à chaud. Le fer et l'alumine se dissolvent, tandis que le manganèse à l'état de bioxyde reste insoluble ; le résidu, recueilli et lavé sur un filtre, est calciné puis transformé en sulfate de manganèse que l'on pèse. Quant au mélange de sesquioxyde de fer et d'alumine, il est évaporé, calciné et pesé. Pour doser séparément les deux bases, on peut recourir à la méthode indiquée par Rivot et basée sur l'action de l'hydrogène à haute température. Le mélange est, à cet effet, placé dans une nacelle de porcelaine, renfermée elle-même dans un tube qu'on chauffe au rouge vif pendant quelques heures et par lequel on fait passer un courant d'hydrogène pur. L'oxyde de fer est réduit, tandis que l'alumine n'est pas attaquée. On pèse le mélange de fer et d'alumine, puis on l'attaque par l'acide sulfurique qui ne dissout que le fer. L'alumine est ensuite filtrée, séchée et pesée, et la différence de ce poids avec celui de la précédente pesée donne la quantité de fer. Quant au poids précédemment obtenu du mélange d'alumine et de sesquioxyde de fer, il peut fournir un moyen de vérification.

B. Analyse d'un calcaire bitumineux. — Les calcaires bitumineux contiennent presque toujours des pyrites de fer qui, en donnant naissance, pendant la cuisson, à du sulfate de chaux, exercent une action nuisible à la qualité des chaux hydrauliques. Il est donc important de déterminer la proportion de sulfate de chaux que contient un échantillon de calcaire, soumis préalablement à un grillage à une température un peu supérieure au rouge sombre.

Ce dosage peut s'effectuer, comme nous l'avons indiqué précédemment, en traitant la matière par l'eau, pendant un temps suffisamment prolongé pour que tout le sulfate se dissolve, et en dosant ensuite l'acide sulfurique et la chaux contenus dans la dissolution.

L'eau, les matières organiques et l'acide carbonique se déterminent par la perte de poids que la calcination fait éprouver à un échantillon de calcaire d'un poids

déterminé ; on peut, d'ailleurs, évaluer directement l'acide carbonique par le procédé déjà décrit.

Pour les dosages des autres éléments, ils s'effectuent comme précédemment, à la seule différence qu'au lieu d'opérer sur le calcaire naturel on procède à l'analyse d'un échantillon après grillage et traitement par l'eau, opérations qui éliminent les matières organiques et les pyrites. Le poids de la chaux, obtenu dans cette dernière analyse, doit naturellement être augmenté de celui de la chaux dosée dans la dissolution par l'eau du produit du grillage.

Dosage du carbonate de chaux par les liqueurs titrées. — Si l'on a reconnu, par une analyse qualitative préalable, que le calcaire essayé ne renferme que de l'argile et du carbonate de chaux, ou du moins si les éléments qui s'y trouvent mélangés sont en quantités négligeables, on peut se contenter de déterminer la proportion du carbonate de chaux et recourir dans ce cas à une méthode d'analyse très rapide au moyen des liqueurs titrées.

A cet effet, on prépare, d'un côté, une liqueur composée d'une partie d'acide chlorhydrique concentré et de 4 parties d'eau, on détermine le poids p de carbonate de chaux que peut décomposer un volume v de cette liqueur par la perte de poids qu'éprouve un morceau de marbre blanc très pur abandonné dans la liqueur jusqu'à neutralisation complète de l'acide. D'un autre côté, on remplit une burette graduée d'une dissolution de saccharate de chaux dont on verse goutte à goutte le contenu dans un nouveau volume v de l'acide chlorhydrique titré auquel on ajoute quelques gouttes de tournesol. Lorsque la coloration du tournesol passe du rouge au bleu, on note le nombre N de divisions de la burette qu'il a fallu verser pour arriver à la neutralisation. Le volume de ces N divisions de saccharate de chaux correspond, au point de vue de la neutralisation, à un poids p de carbonate de chaux, par conséquent chaque division de la burette correspond à un poids $\frac{p}{N}$ de carbonate de chaux.

Ces deux liqueurs étant préparées, il est dès lors facile, au moyen d'une seule pesée, de déterminer la proportion de carbonate de chaux que contient un calcaire donné. On pèse un poids p de l'échantillon à essayer que l'on met en contact avec le volume v d'acide titré. Quand l'action est terminée, on ajoute quelques gouttes de tournesol. Si l'échantillon était du carbonate de chaux pur, l'acide serait simplement saturé comme précédemment et la teinture indiquerait la neutralisation par sa coloration bleue, mais avec un calcaire contenant de l'argile, une partie de l'acide reste libre. Il faut alors verser, avec la burette, une certaine quantité de saccharate de chaux pour faire virer la liqueur au bleu. Si n est le nombre de divisions versées, la quantité de carbonate de chaux contenue dans le poids p de calcaire sera égale à $p - \frac{pn}{N} = p \left(1 - \frac{n}{N} \right)$.

DES DIFFÉRENTES ESPÈCES DE CHAUX ET CEMENTS

Tous les calcaires peuvent servir à fabriquer la chaux; mais les matières associées au carbonate de chaux, en proportions variables, modifient plus ou moins profondément les qualités et les propriétés des chaux obtenues.

D'après ces propriétés, on divise les chaux en *chaux aériennes* et *chaux hydrauliques*.

Les *chaux aériennes*, après avoir été réduites en pâte par le mélange avec une certaine quantité d'eau, ont la propriété de durcir à l'air, mais elles conserveraient leur état mou hors du contact de l'air et par conséquent sous l'eau où elles se dissoudraient peu à peu.

On distingue deux sortes de chaux aériennes : la *chaux grasse* et la *chaux maigre*. Les chaux grasses s'obtiennent en soumettant à la cuisson le marbre blanc ou certains calcaires à peu près dépourvus de matières étrangères. Elles se combinent à l'eau, en développant une forte chaleur et en donnant lieu à un foisonnement considérable. Les chaux maigres se résolvent, dans les mêmes circonstances, en une pâte n'ayant ni le liant, ni l'onctuosité des précédentes. La chaleur développée est beaucoup moindre et le foisonnement presque nul.

Elles sont fournies par les calcaires mélangés de sable plus ou moins fin, de magnésie, d'oxyde de fer ou de manganèse, mais ne renfermant que peu ou point d'argile.

Le tableau suivant indique la composition chimique d'un certain nombre de calcaires ainsi que celle des chaux grasses ou maigres qu'ils fournissent.

| PROVENANCE des calcaires. | COMPOSITION DES CALCAIRES | | | | | COMPOSITION DES CHAUX. | | | | | OBSERVATIONS. |
|---------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------|---------|--------|------------------------|-----------|---------------|---------|--------|----------------------|
| | Carbonate de chaux. | Carbonate de magnésie. | Oxyde de fer. | Argile. | Sable. | Chaux. | Magnésie. | Oxyde de fer. | Argile. | Sable. | |
| Marbre de Car- rare..... | 100, | » | » | » | » | 100,0 | » | » | » | » | Très grasse. |
| Vaugirard..... (près Paris). | 98,5 | » | » | 1,5 | » | 97,2 | » | » | 2,80 | » | Très grasse. |
| Lagneux (Ain)... | 94, | 1,60 | 5,9 | 0,5 | » | 91,6 | 4,5 | » | 6,00 | » | Grasse. |
| Vichy (Allier)... | 87,2 | 10, | 2,8 | » | » | 86,0 | 9,0 | » | 5,00 | » | Médiocrement grasse. |
| Calviac..... (Dordogne). | 77,8 | » | » | 2,6 | 19,64 | 70,0 | » | » | 3,25 | 24,75 | Très maigre. |
| Villefranche.... (Aveyron). | 60,9 | 30,30 | 8,8 | » | » | 60,0 | 26,2 | 15,8 | » | » | Très maigre. |

Les *chaux hydrauliques* sont ainsi nommées parce que la pâte, qui résulte de leur extinction dans l'eau, jouit de la propriété précieuse de faire prise, c'est-à-dire de durcir sous l'eau ainsi que dans les lieux humides privés ou non privés d'air. La pâte qu'elles fournissent n'est jamais aussi fine ni aussi foisonnante que celle des chaux grasses. Leur degré d'hydraulicité, c'est-à-dire la rapidité plus ou moins grande avec laquelle elles font prise, a d'abord été pris comme base de la classification de ces chaux.

Dans la pratique, pour éprouver l'hydraulicité d'une chaux, on réduit un échantillon de cette chaux, préalablement éteinte, en une pâte ni trop ferme, ni trop molle; puis, quand la chaleur développée par l'extinction s'est entièrement dissipée, on forme, avec cette pâte, une boule d'environ 5 centimètres de diamètre que l'on jette dans un verre à pied et que l'on tasse en frappant sur le fond du verre avec la main, jusqu'à ce que la surface supérieure de la pâte soit devenue sensiblement plane. On la recouvre ensuite d'une eau potable et on l'abandonne pendant un temps plus ou moins long.

Si la chaux est *éminemment hydraulique*, la prise a lieu du deuxième au sixième jour, suivant la température de l'eau; cette même chaux doit être dure et insoluble à la surface au bout d'un mois et donner des éclats par le choc après six mois.

Une chaux *moyennement hydraulique* ne fera prise, dans les mêmes circonstances, que du sixième au neuvième jour; après quatre à cinq mois, sa consistance sera comparable à celle que prend à l'air une pâte argileuse, pétrie à bonne consistance.

Enfin, une chaux *faiblement hydraulique* ne fera prise que du neuvième au quinzième jour; sa consistance, après six mois, ne dépassera pas celle du savon sec et l'eau d'immersion pourra encore se couvrir d'une pellicule de chaux carbonatée.

Pour déterminer le moment de la prise on se sert d'un appareil appelé *aiguille Vicat* (figure 2). Il consiste essentiellement en une tige terminée par une aiguille à 0^m,0012 de diamètre, dont la section est dressée parfaitement d'équerre à la lime.

Cette tige est guidée verticalement dans un châssis en bois et supporte à l'extrémité opposée à l'aiguille, une petite masse de plomb qui porte son poids à 300 grammes. La section de l'aiguille étant de 1^{mm},45, cette charge équivaut à une pression de 26^k,5 par centimètre carré.

On dit qu'une pâte a fait prise, lorsqu'elle a acquis une cohésion assez forte pour supporter cette aiguille sans dépression sensible.

Un appareil analogue peut servir à déterminer la dureté comparative d'un mortier; dans ce cas, on laisse tomber l'aiguille d'une certaine hauteur et on compare les enfoncements dans les divers échantillons.

Quoi qu'il en soit, le moment de la prise d'une chaux n'est pas toujours facile à

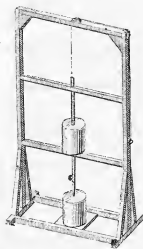


Fig. 2.

constater exactement. D'autre part, si la chaux est restée exposée à l'air et s'est éventée, sa prise se trouve retardée, de telle sorte qu'une même chaux peut, suivant les cas, se trouver placée, d'après ce système, dans une classe ou dans une autre. Pour ces motifs, on a été amené à prendre, pour base de la classification des chaux, la composition chimique, ou plutôt le rapport entre les poids des matières hydraulisantes (silice et alumine) et celui de la chaux caustique, rapport auquel on a donné le nom d'*indice d'hydraulicité*. Dans cette nouvelle classification, les divisions ont été établies de la manière suivante :

| DÉSIGNATION DES PRODUITS. | Indices d'hydraulicité. | Rapport de l'argile au carbonate de chaux dans le calcaire. |
|-----------------------------------|-------------------------|---|
| Chaux faiblement hydraulique..... | 0,10 à 0,16 | 0,05 à 0,09 |
| — moyennement hydraulique.... | 0,16 à 0,31 | 0,09 à 0,17 |
| — simplement hydraulique..... | 0,31 à 0,42 | 0,17 à 0,22 |
| — éminemment hydraulique..... | 0,42 à 0,50 | 0,22 à 0,27 |

Les *chaux limites* sont des chaux dont l'indice d'hydraulicité est compris entre 0,50 et 0,65, et qui proviennent, par suite, de calcaires dans lesquels le rapport de l'argile au carbonate de chaux varie entre 0,27 et 0,56. Suivant le degré de cuisson de ces calcaires, les produits présentent des propriétés très différentes.

Lorsque la cuisson s'est opérée à une température simplement suffisante pour expulser l'acide carbonique, la chaux obtenue est très difficile à éteindre. Beaucoup de fragments ne s'éteignent même que bien longtemps après l'emploi, et ce retard a pour résultat de disjoindre les maçonneries et de rendre les mortiers pulvérulents ; c'est pourquoi il convient de proscrire l'emploi de semblables chaux dans les constructions.

Mais lorsque la température de la cuisson a été assez élevée pour produire un commencement de vitrification, la chaux limite broyée et pulvérisée, puis gâchée, devient alors un produit éminemment hydraulique, qui fait prise au bout d'une période de temps variable, mais inférieure à seize heures, et qui constitue ce qu'on appelle le *ciment de Portland* ou *ciment à prise lente*, d'un usage aujourd'hui très répandu.

Le ciment de Portland, dont la découverte est relativement récente, est d'origine anglaise. C'est en 1824 que J. Aspdin, en cherchant à obtenir des chaux hydrauliques artificielles, d'après les indications fournies par Vicat, arriva à préparer ce remarquable produit par la cuisson d'un mélange de craie et de vase argileuse. Il lui donna le nom de ciment de Portland, en raison de la ressemblance qu'il présentait avec le calcaire jurassique de Portland, en se solidifiant, après avoir été gâché avec de l'eau.

Les ciments à prise lente naturels renferment tous une certaine proportion de potasse ou de soude (1 à 2 pour 100). La présence de ces alcalis est considérée comme très utile à la qualité de ces ciments ; aussi, quand les matériaux dont on dispose pour la fabrication n'en renferment pas, il convient d'ajouter au calcaire environ 1 pour 100 de carbonate de soude ou de potasse ou simplement de chlo-

rure de sodium. Le rôle des alcalis, dans cette circonstance, semble consister dans l'attaque des silicates, qui en rend la fusion plus facile et donne lieu, avec un même degré de chaleur, à des réactions plus énergiques.

L'acide sulfurique et les sulfures sont au contraire nuisibles à la qualité des ciments, surtout pour les ouvrages à la mer.

Lorsque le rapport de l'argile au carbonate de chaux dans le calcaire dépasse 0,56 tout en restant inférieur à $\frac{2}{3}$, les produits de la cuisson correspondants ont des indices d'hydraulicité compris entre 0,65 et 1,20, et constituent les *ciments à prise rapide ou ciments romains*.

Les ciments se distinguent des chaux en ce qu'ils ne s'éteignent pas. Pour les réduire en poudre, il faut les broyer après la cuisson. Cette poudre, gâchée avec une certaine quantité d'eau, durcit très rapidement dans l'air ou dans l'eau.

Les ciments romains, dans lesquels la proportion d'argile se rapproche de la limite supérieure, font souvent prise avec une telle rapidité qu'on a à peine le temps de les manipuler.

Quand l'indice d'hydraulicité dépasse 1,20, la qualité des ciments devient médiocre, ils acquièrent moins de dureté par la solidification et sont, pour ces motifs, désignés sous le nom de *ciments maigres*.

Enfin, quand, par la cuisson, on obtient des produits dans lesquels la proportion d'argile est plus du triple de la proportion de chaux, ceux-ci ne jouissent plus de la propriété de former une pâte avec l'eau, ils constituent des *pouzzolanes artificielles*, lesquelles, ainsi que les pouzzolanes naturelles, mélangées à froid avec de la chaux grasse forment des mortiers analogues à ceux que l'on obtient avec la chaux hydraulique ou le ciment.

La classification précédente, fondée en principe sur le rapport de l'argile à la chaux, n'a évidemment rien d'absolu; la nature procède, en réalité, d'un composé à un autre par des nuances insensibles, entre lesquelles il n'existe pas de lignes de démarcation bien nettes. De plus, le degré de cuisson a, indépendamment des matières mises en œuvre, une influence très grande sur les propriétés hydrauliques des produits.

Chaux magnésiennes. — Jusqu'ici nous avons exclusivement attribué l'hydraulicité des chaux à la présence de l'argile et de la silice hydratée. Cependant, certains calcaires, tout en ne contenant qu'une faible quantité d'argile, peuvent donner lieu, grâce à la présence d'une forte quantité de carbonate de magnésie, à des chaux éminemment hydrauliques qu'on désigne sous le nom de *chaux magnésiennes*.

En 1865, H. Sainte-Claire Deville a constaté que la magnésie obtenue par la calcination du chlorhydrate ou du nitrate, réduite en pâte et exposée sous un filet d'eau, y durcit en quelques semaines. Mélangée au sable, la magnésie, calcinée au rouge sombre, donne un mortier hydraulique. Calcinée au rouge blanc, elle perd cette propriété.

Parmi les calcaires magnésiens susceptibles de fournir des chaux éminemment hydrauliques, il convient de citer les dolomies de Paris et de Robache, près de Saint-Dié (Vosges).

Le tableau suivant donne la composition de ces dolomies, ainsi que celle des chaux qui en proviennent.

| CALCAIRES ET CHAUX. | Chaux. | Magnésie. | Acide carbonique. | Argile. | Eau. |
|-------------------------------|--------|-----------|-------------------|---------|------|
| Dolomie de Paris | 28,75 | 19,40 | 44,02 | 5,50 | 2,26 |
| Dolomie de Robache... .. | 29,58 | 21,55 | 43,82 | 5,25 | » |
| Chaux magnésienne de Paris... | 55,82 | 55,95 | » | 10,25 | » |
| — — de Robache. | 54,25 | 59,76 | » | 6,01 | » |

Le rôle de la magnésie n'est pas encore parfaitement connu. Certains exemples de désagrégation des mortiers hydrauliques magnésiens sont, d'ailleurs, de nature à laisser quelques doutes sur leur longue durée et doivent, tout au moins, engager les constructeurs à apporter une certaine réserve dans l'emploi des chaux de cette espèce, jusqu'à ce qu'une expérience suffisamment prolongée ait permis de se prononcer sur la valeur des travaux pour l'exécution desquels on a fait usage de ces chaux.

Carbonates basiques de chaux. — M. Raoult¹ a constaté la propriété de durcir au contact de l'eau avec tous les carbonates basiques qu'on peut obtenir en chauffant une chaux quelconque, pure ou non, dans une atmosphère d'acide carbonique.

Après avoir calciné des cristaux purs de spath d'Islande au rouge vif, il chauffe la chaux obtenue, au rouge naissant, dans un courant d'acide carbonique, pendant une demi-heure environ, jusqu'au moment où disparaît l'incandescence produite par l'absorption rapide de ce gaz. Il obtient ainsi un carbonate bibasique de chaux, contenant à peu près la moitié de l'acide carbonique qui avait été expulsé au rouge vif. Ce produit diffère d'un simple mélange de chaux et de carbonate neutre par les propriétés suivantes :

Abandonné à l'air humide, il ne se délite pas. Placé dans la vapeur d'eau sèche, à 200°, pendant plusieurs heures, il ne s'hydrate point. Réduit en poudre impalpable et gâché avec un peu d'eau, il fait prise en moins d'une heure comme les ciments hydrauliques et sans s'échauffer sensiblement.

Le durcissement a lieu dans une atmosphère saturée d'humidité et privée d'acide carbonique aussi bien que dans l'air libre ; il a également lieu sous l'eau.

Le produit hydraté a pour formule $(\text{CaO})^2, \text{CO}_2, 11\text{H}_2\text{O}$. Réduit en poudre et lavé avec de l'eau, il perd à peu près toute la chaux, qui ne peut être retenue à l'état de carbonate neutre. Chauffé au rouge naissant pendant une heure, il perd toute son eau, et à partir de ce moment, il se comporte comme un simple mélange de chaux et de carbonate neutre.

Un carbonate basique de chaux, renfermant à très peu près 5 équivalents de chaux pour 2 équivalents d'acide carbonique, a été obtenu en chauffant pendant quatre jours la chaux du spath dans de l'acide carbonique pur, à la pression atmosphérique. Ce composé s'est hydraté en présentant des phénomènes semblables à ceux qui viennent d'être cités.

1. Comptes rendus à l'Académie des sciences, 1881.

CUISSON DES PIERRES A CHAUX

Pour obtenir la chaux vive, il faut soumettre les pierres calcaires à une température assez élevée et suffisamment prolongée; cette opération constitue ce que l'on appelle *la cuisson ou calcination de la pierre à chaux*¹.

Généralités sur la cuisson. — Bien que le carbonate de chaux commence à se décomposer vers 500°, la température qui convient à la cuisson industrielle de la chaux est celle du rouge vif. La résistance à la cuisson est, d'ailleurs, très variable suivant le degré de porosité de la pierre; sous ce rapport, on constate souvent des différences très notables, même en opérant sur des calcaires extraits d'une même carrière, mais provenant de couches différentes. Pour obtenir une cuisson régulière, il y a donc un certain intérêt à trier préalablement les pierres mises en œuvre, de manière à ne comprendre dans une même cuisson que des calcaires de nature semblable. La rapidité de la cuisson dépend encore de la grosseur des fragments de pierre soumis à la calcination, car la décomposition du calcaire ne se propage que lentement de la surface à l'intérieur. Il ne faudrait cependant pas pousser trop loin la division des fragments; il importe, en effet, que les amas de pierres soumis à la calcination soient facilement traversés par les gaz de la combustion. L'expérience montre que les morceaux de la grosseur la plus convenable sont ceux qui pourraient passer, dans tous les sens, à travers un anneau de 0^m,08, mais qui seraient retenus par un anneau de 0^m,05.

L'expulsion de l'acide carbonique du calcaire est facilitée par une production de vapeur d'eau au milieu de la masse. Gay-Lussac a mis ce fait en évidence par une expérience facile à reproduire. Il suffit d'introduire des fragments de calcaire dans un tube que l'on porte graduellement jusqu'à la température à laquelle commence le dégagement de l'acide carbonique et que l'on abandonne ensuite au refroidissement jusqu'au rouge sombre, de manière à arrêter complètement tout dégagement; si l'on vient, à ce moment, à faire passer de la vapeur d'eau à travers le tube, l'acide carbonique apparaîtra de nouveau en assez grande quantité. En un mot, le dégagement du gaz cessera chaque fois que l'on arrêtera le courant de vapeur d'eau et reprendra immédiatement dès que ce courant sera rétabli.

Ce rôle de la vapeur d'eau est parfaitement connu des chauxourniers, qui préfèrent toujours, pour la cuisson, les pierres nouvellement extraites à celles qui, par une longue exposition à l'air, ont perdu leur eau de carrière. Lorsqu'ils sont obligés

1. Dans la suite de ce travail, nous avons fait divers emprunts à la Chimie technologique et industrielle de Knapp, traduite, revue et augmentée par MM. Debize et Mérijot.

de recourir à ces dernières, ils trouvent qu'il y a encore avantage à arroser les pierres, malgré la chaleur qu'absorbe la vaporisation de cette eau.

Le passage d'une assez grande quantité d'air entre les pierres soumises à la calcination agit, comme la vapeur d'eau, pour favoriser le dégagement de l'acide carbonique. Aussi, quelques chauxfourniers ont-ils coutume de placer, parmi les pierres à calciner, des pièces de bois verticales ou inclinées qui, après leur combustion, forment, à travers la masse, des cheminées capables de provoquer des appels d'air.

Lorsqu'il s'agit de la cuisson de pierres à chaux grasse, le règlement de la température n'a qu'une assez faible importance sur la qualité de la chaux obtenue; mais il n'en est plus de même lorsque l'on calcine des pierres à chaux hydraulique; il est essentiel, dans ce cas, de surveiller, avec le plus grand soin, la marche de la température et de s'assurer de la répartition égale de la chaleur dans l'intérieur du four.

La propriété hydraulique d'un calcaire argileux ne commence, en effet, à se développer que lorsque la cuisson est arrivée à un certain degré; elle augmente peu à peu avec la température, atteint un maximum, puis décroît, si la température continue à s'élever. En d'autres termes, il existe une température déterminée pour laquelle la propriété hydraulique du calcaire atteint son maximum.

Cette température dépend, d'ailleurs, essentiellement de la nature et des proportions des matières associées au calcaire, c'est-à-dire par conséquent d'éléments très variables. La durée, pendant laquelle la chaleur doit agir, n'a pas moins d'influence que le degré de température et doit aussi varier, pour les mêmes motifs, entre des limites assez étendues.

Il résulte de là que la cuisson des calcaires hydrauliques constitue une opération difficile, exigeant, de la part des chauxfourniers, beaucoup d'habileté et de soin et au sujet de laquelle il est impossible de formuler aucune règle générale; on en est réduit à déterminer, par tâtonnements, dans chaque installation nouvelle, les conditions les plus favorables au traitement des calcaires dont on dispose.

Toutefois, les données expérimentales suivantes peuvent fournir quelques indications utiles pour diminuer ces tâtonnements. Lorsqu'un calcaire renferme en majeure partie de la silice, à un état quelconque, il convient de le soumettre à une chaleur modérée maintenue pendant un temps suffisamment long; si, au contraire, l'argile prédomine, il est préférable de le porter à une température plus élevée, mais d'une plus faible durée.

La décomposition du carbonate de chaux, sous l'action de la chaleur, est favorisée par la présence de la silice et surtout par la présence simultanée de la silice et de l'eau. Un mélange, par parties égales, de carbonate de chaux et de silice, préalablement desséché, ayant été maintenu, pendant deux heures, à une température qui n'avait fait éprouver aucune perte de poids au carbonate de chaux pur, a perdu une quantité d'acide carbonique représentant 5,4 pour 100 du poids du carbonate de chaux; cette perte s'est élevée à 10,6 pour 100 avec le même mélange non desséché.

Le carbonate de magnésie abandonne son acide carbonique un peu avant 400°, température bien inférieure à celle qu'exige le carbonate de chaux.

DES DIFFÉRENTS PROCÉDÉS DE CUISSON.

Les procédés plus ou moins perfectionnés auxquels on a recours pour opérer la cuisson de la chaux varient suivant les ressources dont on dispose, l'importance de la production et la nature du combustible employé.

Ces différents procédés se rapportent à deux méthodes distinctes. L'une consiste à opérer la calcination *par intermittence* ; dans ce cas, on cuit une charge préalablement préparée, puis on arrête le feu et on retire la chaux après refroidissement. L'autre consiste à opérer *d'une manière continue*, en renouvelant sans cesse la charge au fur et à mesure de l'extraction de la chaux cuite.

En outre, chacune de ces méthodes peut comporter deux modes de chauffage différents. Dans la calcination à *longue flamme*, le combustible et la pierre sont séparés, tandis que dans la calcination à *courte flamme*, on stratifie le combustible et le calcaire par couches superposées.

Dans l'exposé qui va suivre, nous distinguerons donc quatre modes de calcination :

- 1° Calcination intermittente à longue flamme ;
- 2° Calcination intermittente à courte flamme ;
- 3° Calcination continue à courte flamme ;
- 4° Calcination continue à longue flamme.

Pour chacun de ces modes de calcination, nous indiquerons les principales dispositions consacrées par l'usage.

1° CALCINATION INTERMITTENTE A LONGUE FLAMME

L'arrangement des pierres dans le four a une certaine importance, dans le cas dont il s'agit, pour arriver à obtenir une cuisson bien régulière. Les plus grosses pierres doivent être placées dans les endroits les plus exposés au feu, et les charges de menues pierres doivent être réparties avec soin, de telle sorte que la chaleur se répande également dans toutes les parties du four.

Avant de commencer la charge, on construit la voûte qui doit recouvrir le foyer au moyen de pierres calcaires de même nature que le reste de la charge ; on choisit, à cet effet, des pierres plates que l'on emploie comme claveaux et qui laissent entre elles des intervalles suffisants pour donner libre passage aux gaz de la combustion. Immédiatement au-dessus de cette voûte, on place les plus grosses pierres, qui nécessitent une chaleur plus forte et plus prolongée pour être complètement calcinées ; pour les couches suivantes, on choisit des pierres de volume graduellement décroissant et l'on réserve les plus petits fragments pour les couches supérieures ainsi que pour les parties voisines des parois du four.

La charge étant ainsi préparée, on procède à l'allumage du feu sous la voûte réservée à la base ; dès le commencement et pendant les dix à douze premières heures, le feu doit être très modéré, afin d'échauffer progressivement le calcaire et

les parois du four. En faisant un feu trop actif au début, on risquerait de produire l'éclatement des pierres immédiatement placées au-dessus du foyer et par suite un affaissement de la charge; de plus, la calcination des pierres des couches inférieures serait déjà très avancée quand les couches supérieures seraient à peine échauffées.

Après cet échauffement préalable qui constitue ce que l'on appelle *petit feu* ou *fumage*, on active le feu de manière à porter peu à peu le calcaire au rouge vif. Si l'orifice du gueulard est étroite, les gaz de la combustion, au lieu de s'élever, peuvent avoir une tendance à sortir par la porte du foyer, on établit le tirage en fermant partiellement cette porte. Dès que la flamme débouche à la partie supérieure, le feu doit conserver son allure jusqu'au moment où la cuisson du calcaire peut être considérée comme complète.

On reconnaît que ce degré de cuisson est atteint aux indices suivants :

1° Au tassement qui se produit dans toute la masse et qui atteint ordinairement le sixième du volume de la charge;

2° A la coloration de la fumée; au début de l'opération, elle est brune, puis d'un rouge foncé, ensuite violette, bleue; à la fin, elle est blanche ou presque incolore;

3° A la couleur des pierres, qui prennent une belle teinte rose blanchâtre.

Enfin, il est bon de prélever quelques morceaux à la partie supérieure du four et de s'assurer, après les avoir éteints et convertis en bouillie, qu'ils ne font plus d'effervescence avec un acide.

La cuisson proprement dite a une durée de 5 jours environ; après un refroidissement de 24 à 48 heures, on procède à l'extraction de la chaux du four.

Des différentes espèces de fours employés pour la calcination intermittente à longue flamme. — Dans certains pays encore arriérés au point de vue industriel où le bois est abondant, on rencontre des fours de construction très rustique que l'on établit de la manière suivante : On pratique une large excavation circulaire sur le flanc d'une butte ou sur le bord d'un chemin creux, de telle sorte que le fond de l'excavation puisse être mis en communication directe avec l'extérieur par une galerie horizontale. Les parois de l'excavation sont revêtues d'une maçonnerie en pierres sèches de même nature que celles qui doivent être soumises à la cuisson, mais de plus gros échantillon, et l'on effectue ensuite la charge du calcaire comme nous l'avons indiqué précédemment. La figure 5 représente un four ainsi établi.



Fig. 5.

Il est certain qu'un four aussi rudimentaire est peu économique au point de vue de la consommation du combustible et même au point de vue de la main-d'œuvre, quand il s'agit d'une fabrication de chaux régulière. Dans ce der-

nier cas, il y a tout intérêt à construire des fours en maçonnerie de pierre ou de briques, garnie d'un revêtement intérieur en briques réfractaires hourlés en mortier de terre à four.

Les formes les plus faciles à exécuter sont les formes prismatiques droites à section carrée ou rectangulaire avec un ou plusieurs foyers à la base; mais, dans de semblables fours, les pierres placées dans les angles n'arrivent pas au même degré de cuisson que le reste de la charge. A ce point de vue, les formes cylindriques sont préférables; le plus souvent on adopte la section circulaire qui donne lieu à la moindre déperdition de chaleur, tout en procurant une plus grande résistance à la poussée des terres; tels sont les fours usités en Champagne et en Lorraine; cependant on rencontre quelquefois, notamment près de Mauriac, des fours à section elliptique.

Avec ces formes simples, l'orifice supérieur ou *gueulard* a des dimensions très grandes. Afin de diminuer la déperdition de chaleur par cette ouverture et de diriger plus facilement la cuisson, on a coutume d'élever la charge de calcaire au delà de la maçonnerie du four, on donne à la partie ainsi en saillie la forme d'une calotte et on la recouvre de pierres plates maçonnées avec de la terre grasse, ou tout simplement d'une couche d'argile, ou encore, de terre gazonnée. On peut alors, en pratiquant convenablement des trous d'évent en différents points de ce revêtement, arriver à répartir assez régulièrement la chaleur à l'intérieur du four.

On construit aussi des fours intermittents à longue flamme dont le vide intérieur est de forme ovoïdale; nous citerons entre autres le four de Fink, représenté par les figures 4 et 5. Ce four est très usité dans les environs de Darmstadt pour des fabrications d'une certaine importance et réalise dans sa construction quelques perfectionnements qui méritent d'être signalés.

Entre la maçonnerie de moellons ordinaire et la garniture en briques réfractaires qui constituent les parois du four, on a ménagé un vide (*e*) rempli de sable ou de cendres, matières peu conductrices qui, par conséquent, sont destinées à diminuer les déperditions de chaleur.

Pour éviter la construction d'une voûte en pierres calcaires, au-dessus du foyer, travail long et pénible qu'il faut répéter à chaque cuisson dans les fours du type précédent, la sole du four est formée de cinq arceaux en briques réfractaires (*f*), qui laissent entre eux un écartement de 0^m,15 et sur lesquels se trouvent placées transversalement des rangées de briques, également réfractaires, posées de champ et laissant entre elles des vides pour le passage des gaz des foyers.

Cette sole à jour présente deux pentes opposées, dirigées vers les orifices d'extraction de la chaux (*c*); au-dessous, sont disposés deux foyers (*a*) avec grilles en fonte et cendriers.

Enfin, le gueulard peut être fermé hermétiquement, à la fin de la cuisson, au moyen d'un couvercle en fer (*d*) recouvert de sable, qui est suspendu à une charpente établie sur la plate-forme supérieure du four et que l'on peut élever ou abaisser à volonté. Cette charpente sert, en outre, à supporter une toiture qui forme un abri contre les pluies d'orage et préserve ainsi le four d'un refroidissement accidentel, qui pourrait être préjudiciable à la marche régulière de la cuisson.

Le bois est le combustible le plus employé, lorsque l'on a recours à ce mode de

calcination; la quantité consommée varie, suivant les cas, d'un à deux stères par mètre cube de chaux calcinée.

Néanmoins, on fait aussi, quelquefois, usage de la tourbe et de la houille grasse. MM. Deblinne et Donop se sont particulièrement occupés de l'emploi de la tourbe. Le four qu'ils ont proposé a obtenu une grande médaille de la Société d'encouragement et présente une certaine analogie avec celui de Fink. Il en diffère par la disposition de la sole, laquelle est formée par une grille circulaire plate, en fonte, et par la réduction du diamètre intérieur du four par rapport à sa hauteur.

Les expériences faites à Essonne, sur ce four, ont donné comme résultat une consommation moyenne de deux mètres cubes de tourbe par mètre cube de chaux obtenu.

Dans les différents fours que nous venons de décrire, les couches inférieures de la charge sont exposées à une température beaucoup plus élevée que les couches supérieures. En général, cette inégale répartition de la chaleur n'offre pas d'inconvénients sérieux si l'on prend soin, comme nous l'avons dit, de placer à la base les plus grosses pierres qui exigent, pour leur cuisson, une plus forte chaleur. Nous devons toutefois signaler une disposition imaginée par Vicat, pour

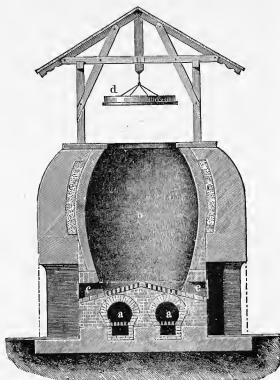


Fig. 4.

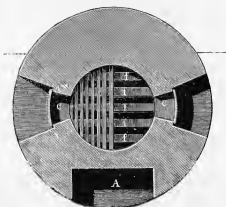


Fig. 5.

obtenir une meilleure répartition de la chaleur. Elle consiste à établir, à la base du four, dont la cuve a la forme d'un cône renversé, trois foyers latéraux dans

chacun desquels on fait successivement du feu, pendant le tiers de la durée de la cuisson; de cette manière les couches inférieures ne sont soumises à une forte chaleur que pendant le tiers de la durée de l'opération, tandis que les couches supérieures ne cessent de rester exposées à la chaleur du courant gazeux.

Pour arriver à un résultat analogue, on a proposé d'adopter des fours à foyers superposés. La cuve est divisée, dans ce cas, en deux compartiments par une voûte à claire-voie établie à une certaine hauteur. Le foyer principal est placé à la base du four et on entretient un second foyer au bas du compartiment supérieur. Cette disposition, de nature à fournir une meilleure utilisation de la chaleur, complique assez notablement la construction du four et en rend la marche beaucoup moins simple. Elle n'a guère été appliquée que pour la cuisson simultanée de la chaux et de la brique.

2^o CALCINATION INTERMITTENTE A COURTE FLAMME

Dans ce mode de calcination, le combustible et le calcaire sont disposés par couches alternatives et superposées. Les épaisseurs des différentes couches varient suivant leur position dans le four et suivant la nature du calcaire ou du combustible employé.

En principe, les couches de combustible doivent être d'autant plus épaisses que la pierre est plus dense et offre plus de résistance à la cuisson; en même temps, les épaisseurs des couches successives doivent aller en diminuant de la partie inférieure à la partie supérieure du four. Quant aux couches de calcaire, leurs épaisseurs doivent varier en sens inverse. Contrairement à ce qui est prescrit pour les fours à longue flamme, il convient de placer les plus grosses pierres à la partie supérieure, car le combustible étant ici mélangé au calcaire et la combustion se propageant peu à peu de bas en haut, il est évident que les couches supérieures restent beaucoup plus longtemps exposées à la chaleur que les couches inférieures.

La houille maigre, la tourbe, le charbon de bois, sont les combustibles le plus généralement en usage dans ce cas; le bois n'est employé qu'exceptionnellement.

La régularité de la cuisson dépend encore ici beaucoup des soins apportés à l'arrangement des pierres dans le four. Elles doivent être disposées de manière à laisser un libre passage aux gaz sans cependant permettre le tamisage du charbon menu à travers les interstices qu'elles laissent entre elles. A cet effet, les lits de calcaire doivent être formés de pierres posées de champ dont on garnit les intervalles avec des morceaux plus petits rapportés par-dessus, avant d'étendre la couche de combustible.

On allume le four en enflammant à la base un tas de copeaux ou de paille mélangés de bois sec. Le feu se propage à la couche inférieure de combustible, puis successivement aux différentes couches. Dès que la fumée apparaît en haut du four, on modère la combustion en fermant partiellement l'orifice inférieur qui donne accès à l'air.

La durée d'une cuisson est de trois à quatre jours. Au moment de l'extraction de la chaux du four, il y a un triage à faire pour isoler la chaux des cendres qui s'y trouvent mélangées.

Cuisson en tas. — Ce procédé, en usage dans le pays de Galles et dans quelques localités situées sur les bords de la Sambre, ne peut être avantageux que quand il s'agit de produire en peu de temps de grandes quantités de chaux. Au lieu de recourir, pour cette opération, à l'emploi de fours qui nécessiteraient des frais d'installation relativement considérables, on s'établit sur une aire circulaire de 5 à 6 mètres de diamètre. On commence par ménager une galerie d'allumage en creusant un fossé partant de la circonférence et se prolongeant un peu au delà du centre et en le recouvrant d'une voûte en pierre à chaux. Puis on procède à la formation du tas, en disposant les couches de calcaire et de houille sur une hauteur de 4 à 5 mètres, d'après les règles générales que nous avons indiquées plus haut. Enfin, la surface du tas est recouverte d'une couche de terre gazonnée sur laquelle on vient encore appliquer des pierres sèches posées à plat.

Pendant la cuisson, on peut diriger le feu facilement, comme on le fait dans la carbonisation du bois en meules, en fermant la galerie d'allumage et pratiquant successivement des événements en divers points de la surface du tas.

L'application de ce procédé donne lieu à une consommation de près de 5 hectolitres de houille en poussière par mètre cube de chaux obtenu. Un quart environ de celle-ci est à l'état de débris mélangés d'une assez forte proportion de cendres.

On n'a guère recours à la cuisson en tas que pour la préparation des chaux destinées à l'agriculture.

Cuisson dans des fours. — Les fours usités pour ce mode de calcination sont de construction très simple. La forme du vide intérieur est ordinairement celle d'un cylindre ou d'un cône tronqué et renversé, comme le représente la figure 6. Avec l'emploi du bois, il conviendrait d'adopter de préférence la forme prismatique à base carrée, laquelle se prête mieux au rangement des pièces de bois, qui peuvent avoir toutes la même longueur; mais, nous le répétons, le bois est rarement stratifié avec le calcaire.

A Utrecht, en Hollande, on extrait la chaux des écailles d'huîtres en les stratifiant avec de la tourbe. Les fours où s'opère cette calcination sont cylindriques; mais, comme les couches d'écailles superposées ne se laissent pas facilement traverser par les gaz de la combustion, il faut se réserver le moyen de provoquer des courants vers les points où ils éprouvent des difficultés à s'établir. A cet effet, le pourtour du four, à la base, est pourvu de nombreux orifices grillés que l'on peut ouvrir ou fermer à volonté; en outre, on donne à ces fours une assez faible hauteur par rapport à leur diamètre.

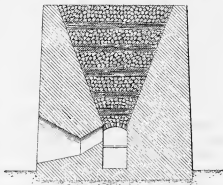


Fig. 6.

3° CALCINATION CONTINUE A COURTE FLAMME

Le mélange du combustible au calcaire par couches alternatives est plus souvent employé avec le système continu qu'avec le système intermittent. Les mêmes fours et les mêmes combustibles peuvent être utilisés dans les deux cas ; toutefois, il est important que les fours à calcination continue présentent à leur base des ouvertures suffisantes pour retirer facilement la chaux pendant la durée de la cuisson. En Angleterre, au lieu de houille on emploie de préférence le coke, qui, étant exempt de matières bitumineuses, donne une chaux plus pure.

Les charges alternatives de calcaire et de combustible se font par le gueulard dans des proportions qui doivent varier suivant la nature du combustible et de la pierre, ainsi que suivant la grosseur des morceaux. La proportion moyenne est de quatre parties de pierre contre une de combustible. Il y a intérêt, au point de vue de la régularité de la cuisson, à composer autant que possible les charges de calcaire de morceaux d'égale grosseur (8 à 10 centimètres en tous sens), car, par le fait même de la continuité de l'opération, toutes les pierres se trouvent sensiblement exposées de la même manière à la chaleur du four.

La forme la plus rationnelle à donner aux fours est celle d'un tronc de cône renversé ou, au moins, une forme telle que les sections horizontales diminuent graduellement vers la base. Cette forme offre, en effet, des facilités pour le chargement ; mais de plus, elle a surtout l'avantage de prévenir l'éparpillement du combustible en maintenant la compacité des couches malgré le retrait produit par la cuisson.

L'allumage et la conduite du feu s'effectuent comme nous l'avons indiqué à propos de la calcination intermittente. Si, par suite de tassements irréguliers, on est amené à constater que la chaleur ne se répartit point également sur toute l'étendue des couches supérieures, le chauffournier s'arme d'une lance et la plonge, en la retournant plusieurs fois, dans les parties imparfaitement atteintes par le feu, de manière à y pratiquer des petits canaux de nature à ranimer sur ces points la combustion. La chaux cuite est extraite avec précaution de façon à éviter des tassements brusques qui dérangeraient l'ordre et la régularité des couches.

Lorsque la marche de la cuisson doit être suspendue pendant une journée de chômage, il faut modérer le feu le plus possible en évitant cependant le refroidissement du four. On répand, à cet effet, une couche de charbon de 8 à 10 centimètres d'épaisseur que l'on tasse en la piétinant après l'avoir mouillée, puis on la recouvre d'un lit de même épaisseur formé de pierres réduites en menus fragments, enfin on ferme tous les issues du four.

Les figures 7 et 8 représentent un modèle de four de ce genre construit à Malain pour les travaux du chemin de fer de Paris à Lyon. La chaux cuite était extraite par quatre orifices (a) placés sur deux faces opposées du four. Deux fours semblables se trouvaient accolés et avaient une capacité totale de 54 mètres cubes ; ils fournissaient une moyenne de 10 mètres cubes de chaux par jour.

Cette forme de four, que nous avons donnée comme la plus rationnelle au point de vue de la cuisson, présente cependant quelques inconvénients. Elle conduit, en effet, à des épaisseurs de maçonnerie exagérées à la base, surtout quand le four atteint

une certaine hauteur; de plus, la déperdition de chaleur par l'ouverture supérieure est relativement considérable en raison de ses grandes dimensions. On évite ces

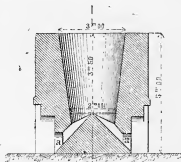


Fig. 7.

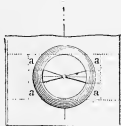


Fig. 8.

inconvenients en ne conservant la forme d'un tronc de cône renversé que pour la

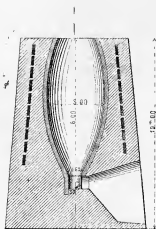


Fig. 9.



Fig. 10.

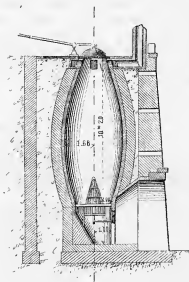


Fig. 11.

partie inférieure de la cuve et en donnant à la seconde partie la forme d'un cylindre, ou mieux encore celle d'un tronc de cône dressé sur sa grande base. En arrondis-

sant les surfaces, on passe de cette dernière forme à la forme ovoïde, qui est la plus usitée aujourd'hui pour les fours continus.

Parmi les fours de ce genre, nous citerons le type de four adopté pour la cuisson de la chaux dans l'importante usine de Paviers (Indre-et-Loire), et qui se trouve représenté sur les figures 9 et 10. Plusieurs fours semblables sont accolés l'un à l'autre et adossés à un escarpement. La face libre de chaque four est percée d'une ouverture qui débouche sous un hangar et qui sert à l'extraction de la chaux cuite.

Les fours de la grande usine de MM. Pavin de Lafarge au Theil, dont la figure 11 indique la disposition, sont également de forme ovoïde, mais ils présentent quelques perfectionnements destinés à assurer la régularité de leur marche. Le gueulard est pourvu d'un couvercle en tôle fixé à l'extrémité d'un levier dont l'axe repose sur un pivot; en manœuvrant convenablement la poignée de ce levier, on peut soulever le couvercle et l'amener sur le côté de manière à découvrir complètement le gueulard.

La partie supérieure du four est, en outre, munie d'un tuyau de cheminée. Lorsque le couvercle est placé sur le gueulard, le tirage s'effectue par cette cheminée et peut être réglé à volonté, au moyen d'un registre. On peut ainsi se mettre à l'abri des perturbations qu'un vent violent peut occasionner dans le tirage. On peut également, les jours de chômage, grâce à cette disposition, interrompre la marche de la cuisson, sans éteindre le feu et en conservant à l'intérieur du four une température sensiblement constante.

Le fond de la cuve est muni d'une grille fixe conique qui sert à diriger les fragments de chaux et à faciliter leur extraction. L'orifice inférieur du four peut être fermé par une porte en fonte, quand le travail est momentanément suspendu. Les fours continus à courte flamme consomment de 2 à 4 hectolitres de houille par mètre cube de chaux cuite, suivant la dureté de la pierre, la qualité de la houille, la forme des fours et les soins apportés à la cuisson.

La consommation moyenne avec la tourbe est de 1 mètre cube environ par mètre cube de chaux produite.

4° CALCINATION CONTINUE A LONGUE FLAMME

Les fours appropriés à ce mode de calcination ont ordinairement la forme d'ellipsoïdes de révolution tronqués aux deux extrémités ou celle de deux troncs de cône opposés base à base.

Le combustible est brûlé dans des foyers spéciaux placés, soit immédiatement au-dessous de la sole du four, soit sur les côtés, à une certaine hauteur au-dessus de cette sole. Cette dernière disposition est particulièrement nécessaire pour obtenir une bonne répartition de la chaleur quand la section du four présente un certain développement; elle offre, de plus, cet avantage que la pierre, arrivant à calcination complète à la hauteur des foyers, subit un refroidissement partiel avant d'arriver au bas du four, en cédant sa chaleur aux couches supérieures.

Avec ce mode de calcination il y aurait intérêt, pour économiser le combustible, à donner aux fours une grande hauteur, par rapport au diamètre moyen, de manière que les gaz des foyers puissent abandonner la plus grande partie de leur calorique

avant de s'échapper dans l'atmosphère. Néanmoins il ne faut pas perdre de vue que

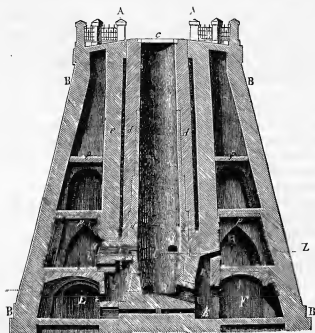


Fig. 12.

l'élévation du four rend souvent plus difficile l'accès du gueulard par lequel s'ef-

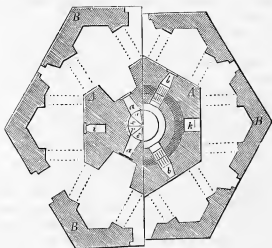


Fig. 15.

fectue le chargement du calcaire et qu'il est nécessaire que la pierre à chaux soit

suffisamment dure pour résister à la pression qui résulte nécessairement du poids de la charge.

Les combustibles employés sont : le bois, la tourbe et certaines houilles à longue flamme. Les bois de petit échantillon, tels que fagots, bourrées, branchages, sont préférables au bois de corde.

En raison de la continuité de l'opération, il convient, autant que possible, de composer les charges successives de calcaire avec des morceaux de grosseur uniforme.

Le mélange de la vapeur d'eau aux gaz du foyer qui, on le sait, facilite beaucoup l'expulsion de l'acide carbonique, offre encore ici l'avantage d'allonger la flamme et de refroidir les grilles. Pour alimenter les foyers de vapeur d'eau, la meilleure disposition consiste à construire, en avant des grilles, des bassins que l'on remplit d'eau à un niveau tel que le cendrier soit toujours noyé. La vaporisation d'eau peut atteindre 1 mètre cube par 10 mètres cubes de chaux.

Parmi les différentes dispositions de four en usage, nous citerons celle qui a été adoptée dans les grandes usines à chaux de Rüdersdorf, près de Berlin, et qui satisfait assez bien aux principales conditions que nous venons d'énoncer.

Le vide intérieur du four est formé (figures 12 et 13) de deux troncs de cône superposés sur leur grande base; leur hauteur totale est de 14^m,20; le diamètre au gueulard et à la sole est de 4^m,90, il est de 2^m,50 à la jonction des deux troncs de cône.

La maçonnerie du four est formée d'une première enveloppe *d* en briques ordinaires avec revêtement *d'* en briques réfractaires sur la paroi intérieure jusqu'à 10 mètres au dessous de la sole. La seconde enveloppe *e*, construite en moellons, est séparée de la première par un vide annulaire de quelques centimètres d'épaisseur rempli de cendres tassées. Enfin ce fourneau occupe la partie centrale d'une sorte de tour en maçonnerie *B* ayant la forme d'un tronc de pyramide à base hexagonale avec laquelle il est relié au moyen de planchers voûtés *pp* qui divisent la hauteur en 4 étages.

Les deux étages inférieurs *E*, *F*, *G*, *H* servent au dépôt et à la dessiccation du combustible; les autres, au logement des ouvriers pendant la nuit.

Les foyers *b*, au nombre de trois, disposés sur les côtés, débouchent dans le four à 2^m,20 au-dessus de la sole. Dans chacun d'eux on brûle de la tourbe ou du bois sur une grille en briques réfractaires soutenue par un arceau transversal; les cendres sont recueillies dans un cendrier *i* dont l'orifice se trouve à l'étage inférieur. Cet orifice, ainsi que l'entrée du foyer, est muni d'une porte en fer ordinairement fermée; l'air arrive sous la grille par un carneau spécial *h*.

L'extraction de la chaux s'effectue à l'étage inférieur par 3 ouvertures *a* réservées à la base du four et également fermées au moyen de portes en fer. Des pentes convenables sont ménagées sur la sole du four vers ces ouvertures pour faciliter l'opération du défournement. En outre, au-dessus de chacun des orifices d'extraction se trouve une cheminée *k* qui entraîne l'air chaud dans le compartiment supérieur et rend ainsi la chaleur plus supportable pour les ouvriers chargés d'extraire la chaux cuite.

Tandis que s'effectue le défournement, à la base, en ouvrant successivement les différents orifices, on entretient le feu dans les foyers et l'on introduit continuelle-

ment du calcaire frais par le gueulard *c*. Au niveau de celui-ci se trouve une plate-forme *A* entourée d'un garde-corps et reliée par une petite voie ferrée à la colline à laquelle le four est adossé.

Pour mettre ce four en marche, on le remplit de calcaire jusqu'au niveau des foyers et l'on cuit cette première charge en faisant du feu dans les ouvertures d'extraction. Lorsque cette cuisson est terminée, on achève de remplir complètement le four, en y descendant d'abord les pierres dans des seaux, puis en les jetant simplement par le gueulard, lorsque la charge est arrivée à un certain niveau. On allume ensuite le feu dans les foyers et, à partir de ce moment, on opère comme dans la marche normale.

Avec les dimensions indiquées, le four peut contenir 40 mètres cubes de calcaire et l'on produit de 9 à 10 mètres cubes de chaux par 24 heures.

En France, on a généralement recours à des fours de construction moins compliquée. Parmi les dispositions en usage pour le chauffage au bois, l'une des plus simples est celle du four à deux foyers de M. Chanard (fig. 1 et 2, planche II). La cuve *H* de ce four a une forme particulière; les sections transversales sont des ovals dont le petit axe est constant et égal à 0^m,90 sur toute la hauteur, tandis que le grand axe diminue depuis la section faite à hauteur des foyers où il est égal à 1^m,40 jusqu'au sommet et à la base de la cuve où il n'est plus que de 1 mètre.

La cuve a une hauteur totale de 6^m,40; les deux foyers *I*, *I* sont placés parallèlement à une hauteur de 1 mètre au-dessus de la sole, ils sont reliés entre eux par une galerie demi-circulaire qui entoure la paroi intérieure du four et ils sont en communication avec la cuve par une sorte de grillage *J* en briques réfractaires placées de champ. Les portes du foyer ne sont ouvertes que pour effectuer les chargements de combustible; l'air nécessaire à la combustion s'introduit par les cendriers.

La chaux cuite s'extrait par une ouverture placée à la base du four sur la face opposée aux foyers. La chaux se trouve maintenue au-dessus de cette ouverture par une grille *R* à barreaux mobiles, que l'on retire au moment du défournement; elle tombe alors sur la sole et on l'amène au dehors au moyen de ringards.

La mise en marche s'effectue comme dans le four précédent, c'est-à-dire en commençant par cuire une première charge de calcaire limitée à la hauteur des foyers au moyen d'un foyer provisoire que l'on établit à la base et que l'on alimente par l'ouverture d'extraction.

Le rendement de ce four est très élevé relativement à sa capacité, il peut atteindre 7 à 8 mètres cubes de chaux par 24 heures.

M. Raucourt, dans son *Traité sur l'art de faire de bons mortiers*, donne le dessin d'un four assez différent, comme forme, des précédents. La cuve du four (figures 14 et 15) se compose d'une partie tronconique *a* reposant par sa grande base sur un demi-cylindre à axe horizontal *b*. Au centre de ce demi-cylindre est une voûte en briques réfractaires *c* convenablement évidée à son sommet pour le passage des gaz. Intérieurement, cette voûte est en communication avec un foyer à flamme renversée *f*; extérieurement, elle forme avec la paroi du four un espace semi-annulaire *b* occupé par le calcaire. Les gaz de la combustion débouchent à la partie supérieure de cet espace et s'élèvent dans le conduit vertical à travers les couches de pierres qui s'y trouvent accumulées. Quant au calcaire, il suit une marche inverse et, arrivé au-dessus de la voûte du foyer, il se répand de chaque côté, jusqu'à la base

de la partie semi-annulaire, qui se trouve munie d'orifices *d* pour l'extraction de la chaux cuite. A partir du point où se produit la bifurcation, les pierres ne se trouvent

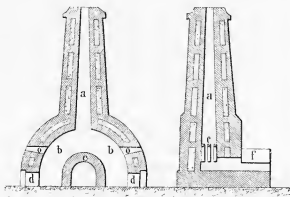


Fig. 14.

Fig. 15.

plus exposées à la flamme du foyer et commencent à se refroidir. On peut activer ce refroidissement en introduisant de l'air froid par des regards *o* ménagés au-dessus des orifices d'extraction.

Le four de M. Simoneau, de Nantes, représenté sur les figures 1 et 2, planche I, a l'avantage de se prêter aux deux méthodes de calcination à longue flamme et à courte flamme, et par suite, de pouvoir fonctionner avec toute espèce de combustible.

La cuve de ce four présente la forme d'un ellipsoïde de révolution inégalement tronqué à ses deux extrémités; le diamètre maximum est de 4^m,40, il est réduit à 5 mètres au gueulard et à 0^m,80 à la partie inférieure. La hauteur totale de la cuve est de 11^m,80.

Ce four est construit en maçonnerie ordinaire avec revêtement intérieur A en briques réfractaires; le parement extérieur qui forme un tronc de cône est consolidé par des cercles en fer. On l'adosse ordinairement à un talus qui permet d'établir une voie d'accès pour amener le calcaire soit par tombereaux, soit par wagonnets jusqu'à la plate-forme du gueulard. Celle-ci est entourée d'un parapet en maçonnerie et recouverte d'une toiture qui abrite l'orifice du gueulard.

La sole de la cuve est formée par une grille qui retient le calcaire, en tamisant les cendres et menus morceaux. Immédiatement au-dessus de cette grille se trouve pratiquée une ouverture M, fermée par une porte en fonte, pour le défournement; au-dessous est le cendrier avec une ouverture spéciale N munie d'un registre pour l'enlèvement des matières tamisées à travers la grille. Une grande galerie voûtée donne un accès facile à ces deux orifices.

Les chauffies G ou conduits des foyers aboutissent dans la cuve à trois mètres au-dessus de la grille. Les foyers C, au nombre de quatre, sont disposés par paire sur deux des faces opposées du four et s'ouvrent, ainsi que leur cendrier, sous des espaces voûtés en communication avec des hangars H adossés à la maçonnerie du four.

Lorsque l'on emploie des combustibles à longue flamme, tels que des bran-

chages ou des ajones, on ferme les orifices inférieurs de la cuve et on entretient un feu vif dans chaque foyer.

Lorsque le chauffage se fait à la houille, on stratifie le calcaire avec le combustible.

Les couches de calcaire sont formées de 5 mètres cubes de pierres; entre chaque couche, on interpose un lit de menus branchages, de 0^m,50 d'épaisseur, sur lequel on répand 7 hectolitres de houille. Si l'on emploie de la tourbe ou de l'anthracite, il faut réduire de moitié ou des 3/5 l'épaisseur des couches de calcaire.

Un pareil four peut contenir 120 mètres cubes de pierres et peut produire 40 mètres cubes de chaux en 24 heures. Avec la houille, le rendement est de 7 à 8 hectolitres de chaux par hectolitre de houille.

FOURS A CIRCULATION.

Ce genre de four appartient à la catégorie des fours continus à longue flamme, en raison du mode d'action du combustible; mais ils diffèrent essentiellement, comme disposition, des fours précédemment décrits.

Parmi ces fours, le four annulaire de MM. Light et Hoffmann, imaginé à l'origine pour la cuisson des briques, est aujourd'hui en usage dans plusieurs grandes usines à chaux.

Il se compose (fig. 3 et 4, planche I) d'une galerie voûtée circulaire divisée sur sa longueur en un certain nombre de parties égales, limitées chacune par une coulisse verticale dans laquelle peut s'engager un registre que l'on introduit par une fente G pratiquée dans la voûte; à chaque fraction de la galerie correspond une porte d'accès B ménagée dans le mur extérieur et un carneau horizontal C aboutissant, par une partie recourbée verticalement, à une seconde galerie circulaire E, concentrique à la première, dite chambre à fumée. Cette communication peut être établie ou supprimée à volonté en soulevant ou abaissant une cloche qui recouvre l'orifice du carneau et qui peut se manœuvrer du haut du massif. Enfin, la chambre à fumée communique elle-même par quatre carneaux en croix avec une grande cheminée centrale D.

Pour rendre compte du fonctionnement d'un pareil four, supposons que la galerie extérieure soit divisée en 12 parties, à chacune desquelles nous attribuerons un numéro de 1 à 12 (figure 16). Considérons le four au moment où la marche normale est établie; les portes extérieures sont toutes fermées à l'exception des portes 1 et 2; le registre est abaissé entre 12 et 1 et le carneau 12 est seul ouvert sur la chambre à fumée. De 2 à 6 inclusivement, la matière est remplie de chaux cuite; la combustion a lieu en 7, et le calcaire à cuire occupe la galerie de 8 à 12.

La division 1, étant libre, reçoit une charge de calcaire frais tandis que l'on défourne la chaux cuite en 2.

L'air appelé par la cheminée entre par les portes 1 et 2, circule à travers la portion de la galerie remplie de chaux cuite, arrive à une température élevée

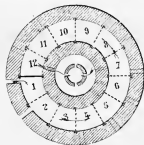


Fig. 16.

sur le combustible en ignition dont il alimente la combustion; puis, de là, le courant gazeux passe dans la seconde partie de la galerie; il y rencontre le calcaire, qu'il échauffe graduellement, et finit par s'échapper dans la cheminée en passant par le carneau ouvert et la chambre à fumée.

Par suite de cette circulation d'air, la chaux cuite se refroidit progressivement de 6 à 2, tandis que le calcaire acquiert, au contraire, une température croissante de 12 à 8.

Lorsque la chaux soumise en 7 directement à l'action du feu est convenablement cuite, on reporte le feu en 8; en même temps, on déplace le registre pour l'engager entre 1 et 2, on ferme le carneau de fumée 12, ainsi que la porte 1, et on ouvre le carneau 1 et la porte 5. Le four se trouve ainsi replacé dans les mêmes conditions que précédemment, et la circulation de l'air et des gaz s'effectue de la même manière, en la rapportant à un point de repère en avance d'une division sur celui qui avait été primitivement pris.

Le combustible se charge dans le compartiment à chauffer, par des trous circulaires II ménagés dans la voûte; ces trous, ainsi que les ouvertures destinées à l'introduction du registre, sont fermés par des couvercles lutés avec de la terre glaise.

Les dimensions de ces fours sont très variables. Les plus petits n'ont pas moins de 10 mètres de diamètre extérieur. La hauteur du massif est de 1^m,50 à 2 mètres et la plate-forme supérieure est recouverte d'une toiture au milieu de laquelle émerge la cheminée. La galerie de cuison a une largeur de 1 mètre à 5 mètres et le nombre des divisions de cette galerie est assez souvent réduit de 12 à 8.

La consommation du combustible dans ces fours correspond à environ 80 kilogrammes de houille par mètre cube de chaux cuite. Cette consommation, relativement faible, permet de réduire notablement le prix de revient de la chaux. Toutefois, il convient de ne pas perdre de vue que l'installation de ces fours est très coûteuse et, dès lors, pour qu'elle soit réellement avantageuse, il faut que la fabrication soit régulière et que l'on soit assuré de débouchés suffisamment considérables.

Four de Swann. — Le four de Swann repose, quant au fonctionnement, sur le même principe que le four précédent, mais il présente des dispositions toutes spéciales qui en rendent la construction très différente.

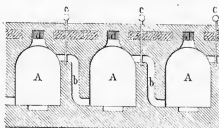


Fig. 17.

Ce four se compose de compartiments distincts A (fig. 17) groupés sur 2 rangées et mis en communication entre eux par des canaux b. Ces canaux partent de la naissance de la voûte de chaque compartiment pour déboucher à la partie infé-

rieure du suivant et peuvent être fermés au moyen de vannes *c*. Du sommet de la voûte part, en outre, un carneau *d* qui permet de mettre un compartiment quelconque en communication directe avec la cheminée.

Le combustible, au lieu d'être mélangé à la chaux, est brûlé sur une grille sans fin (système Tailfer) à alimentation continue. Cette grille est montée sur galets et n'est amenée à l'intérieur d'un compartiment préparé pour la cuisson que pendant le temps nécessaire à la calcination complète du calcaire qui s'y trouve.

Avec ces dispositions spéciales du four à circulation, on peut réaliser une certaine économie dans l'emploi du combustible, la combustion étant rendue aussi complète que possible; d'un autre côté, on obtient une chaux exempte de cendres ou de scories, impuretés qui résultent toujours du mélange du calcaire avec le combustible.

Four continu à tunnel. — Dans les fours à circulation que nous venons de décrire, le combustible est brûlé successivement dans les différentes parties du four, tandis que le calcaire reste immobile pendant tout le temps que dure sa cuisson. Dans le four à tunnel, au contraire, le foyer est fixe et c'est le calcaire qui se déplace. Le principe reste le même : alimentation du foyer avec de l'air préalablement échauffé par son passage sur la chaux cuite et échauffement graduel de la pierre calcaire introduite dans le four par le courant gazeux qui se rend du foyer à la cheminée.

Le four à tunnel, employé d'abord pour la cuisson des briques, tend de plus en plus à se substituer, dans cette industrie, aux fours annulaires. Son utilisation pour la calcination de la pierre calcaire est de date plus récente, et n'a pas encore reçu la consécration du temps; néanmoins, les essais tentés jusqu'ici paraissent donner des résultats très satisfaisants.

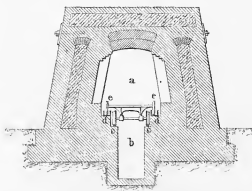


Fig. 18.

Le four à tunnel de Bock consiste en une galerie horizontale rectiligne de 50 à 60 mètres de longueur. Cette galerie est construite en maçonnerie de moellons ou de briques, avec un revêtement intérieur en briques réfractaires. Les foyers sont établis sur le côté de la galerie et leurs orifices de sortie débouchent dans la partie médiane. La figure 18 représente une coupe transversale de la galerie ou tunnel.

La section du vide intérieur présente, dans la moitié supérieure, une partie *a* en forme de trapèze, ayant 1 mètre à 1^m,50 de largeur sur 1^m,40 de hauteur et, au-dessous, une partie rectangulaire *b* plus étroite raccordée avec la première au moyen de deux paliers *cc* et *dd*.

Le palier inférieur *cc* reçoit la voie ferrée sur laquelle circulent les wagons chargés de calcaire; sur l'autre, *dd*, se trouvent des rigoles en fonte remplies de sable dans lesquelles glissent les rebords *ee* rapportés sur les côtés des wagons. Ce dispositif a pour but de former un joint hermétique à hauteur de la plate-forme des wagons, tout en laissant à ceux-ci la mobilité nécessaire, comme le ferait un joint hydraulique. On assemble également les wagons entre eux à joint hermétique en disposant sur leur ligne de jonction des rainures que l'on garnit de terre glaise.

Si nous considérons le four en marche normale, une série de wagons chargés de calcaires remplit toute la longueur de la galerie et, grâce aux joints hermétiques dont nous venons de parler, divise cette galerie en deux parties qui ne sont en communication entre elles que par un intervalle ménagé entre le dernier wagon et la porte de sortie.

L'air extérieur pénètre, du côté de l'entrée, dans la partie inférieure *b* qui reste seule ouverte, circule dans toute la longueur du tunnel en l'échant les trucs qu'il rafraîchit. Arrivé à l'extrémité de la galerie, il revient, en sens inverse, en passant dans la partie supérieure *a*, s'échauffe au contact de la chaux qui vient de subir la cuisson et s'écoule en partie, par des canaux latéraux qui l'amènent aux foyers pour alimenter la combustion. Au sortir des foyers, les gaz enflammés pénètrent dans la partie médiane de la galerie, où ils développent la température nécessaire à la calcination; puis, de là, le mélange gazeux se dirige vers l'entrée en cédant la plus grande partie de sa chaleur au calcaire nouvellement introduit, et s'échappe enfin dans la cheminée placée immédiatement à côté de l'entrée du tunnel.

De nouveaux wagons, introduits toutes les deux heures, viennent, chacun à leur tour, remplacer ceux qui sont repoussés en dehors par la porte de sortie. Ce déplacement de toute la rangée de wagons est obtenu au moyen d'une vis à main, ou d'un engin à vapeur, ou d'un moteur hydraulique. Après leur sortie, les wagons sont déchargés et ramenés du côté de l'entrée de la galerie par des voies extérieures.

On peut utiliser la plate-forme du four comme séchoir. Sur la partie centrale, on amasse le calcaire qui subit une première dessiccation avant son introduction dans le four; sur les parties extrêmes, on sèche le combustible.

Un four de ce genre, établi à Hildesheim et ayant 1 mètre de large, donne un rendement de 200 quintaux de chaux pour 50 quintaux de charbon.

D'après les praticiens, ce système n'offrirait pas d'avantages très sérieux sur les fours annulaires au point de vue de l'économie du combustible, des frais d'installation et de la qualité des produits, mais ils reconnaissent que l'entrée et la sortie des matières est rendue beaucoup plus facile; de plus ce four se prête commodément à l'adjonction d'un séchoir et à l'emploi de combustibles gazeux.

APPLICATION DE LA COMBUSTION DES GAZ AU CHAUFFAGE DES FOURS A CHAUX.

L'idée d'amener les combustibles à l'état de gaz, pour les brûler ensuite, a été

appliquée avec succès dans différentes industries depuis environ 60 ans. L'emploi de gazogènes rend, en effet, possible l'utilisation de combustibles de médiocre qualité (tourbe friable, charbon de terre menu, lignite) qui ne développeraient pas, par eux-mêmes, une chaleur convenable, ou produiraient des gaz nuisibles. La combustion des gaz peut, en outre, se régler avec une très grande facilité, et on peut obtenir tous les degrés de chaleur possibles, tout en obtenant une combustion complète.

Ferd. Steinmann est le premier qui entreprit de construire un four à chaux d'une disposition rationnelle et pratique pour le chauffage au moyen d'un feu de gaz¹. Ses essais furent couronnés de succès et, après différents perfectionnements, Steinmann a adopté le modèle de four représenté dans les fig. 19 et 20, qu'il a désigné sous le nom de four en bastion pour le distinguer du four circulaire.

aa est la cuve de forme annulaire dans laquelle s'accomplit la cuisson du calcaire;

bb l'étalage qui contient la chaux cuite;

g le producteur de gaz ou gazogène;

h le canal de sortie du gaz;

e les branchements établis sur ce canal;

d les carnaux circulaires par lesquels le gaz se répartit sur toute la périphérie de la cuve en passant par les carnaux *c*.

o, orifice d'extraction pour la chaux cuite. Cet orifice, revêtu d'une garniture en fonte, est muni d'une sorte de bouchon conique en terre réfractaire que l'on peut manœuvrer au moyen d'un levier *l* pour régler l'introduction de l'air nécessaire à la combustion du gaz.

L'air introduit par cet orifice s'échauffe au contact de la chaux cuite qui remplit l'étalage et se combine avec les gaz sortant des carnaux en déterminant leur inflammation.

Les six portes *K* donnent accès à l'espace central où l'on peut mettre le calcaire en dépôt avant de l'introduire dans le four.

Avant de procéder au remplissage du four on doit bien en sécher toutes les parties; sans cette précaution, l'inflammation des courants gazeux serait impossible. Après cette dessiccation préalable, on couvre le fond de l'étalage avec du bois d'allumage et l'on répand par-dessus une couche de charbon ou de tourbe de 0^m,50 à 0^m,50 d'épaisseur, puis on établit des couches alternatives de calcaire et de charbon jusqu'à 0^m,60 au-dessus des ouvertures par lesquelles arrive le gaz. A partir de ce point, toute la capacité de la cuve est remplie de calcaire. On prépare, en même temps, les gazogènes; on étend, à cet effet, une couche de copeaux et de bois d'allumage sur la grille, et l'on achève de remplir avec le combustible que l'on veut employer. On commence à mettre le feu à la base du four; puis, quand la flamme atteint les orifices *c*, on commence l'allumage dans les gazogènes. La première extraction de chaux se fait, au plus tard, 3 heures après l'introduction du gaz dans les fours; les extractions suivantes sont espacées, suivant les besoins, à des intervalles réguliers qui varient entre 1 heure 1/2 et 3 heures. Après chaque extraction, le four est de nouveau rempli dans toute son étendue.

1. *Kalk und Luftmörtel* von Dr. H. Zwick.

L'alimentation du gazogène se fait en soulevant le couvercle *r* après avoir préalablement fermé le registre *v* pour éviter des explosions de gaz.

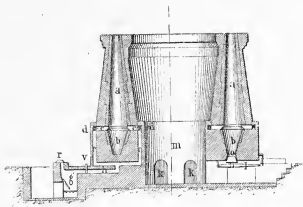


Fig. 19.

On place ordinairement plusieurs fours semblables l'un à côté de l'autre et on les recouvre d'une toiture commune sous laquelle on peut placer le combustible

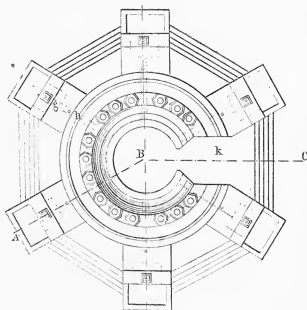


Fig. 20.

ainsi que les dépôts de chaux cuite et qui, en même temps, soustrait dans une certaine mesure les fours à l'influence des coups de vent.

Fig. 22.

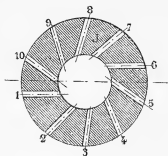


Fig. 21.

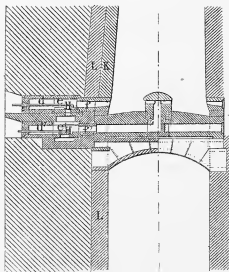
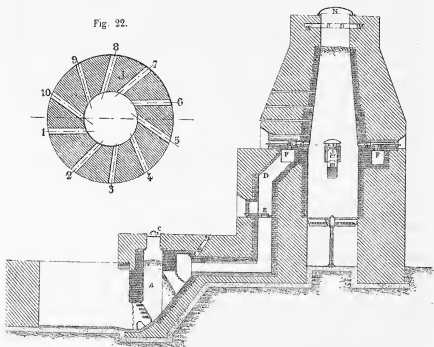


Fig. 23.

Les figures 21, 22, 23 représentent d'après le *Génie civil* ¹ le dessin d'un four à gaz, système Vigreux et Leroy-Desclosages, qui repose sur le même principe que le four précédent, mais qui présente certaines dispositions spéciales.

La cuve (fig. 21) a la forme d'un cylindre surmonté d'un tronc de cône; elle est pourvue d'un revêtement intérieur K formé de blocs de calcaire compact qui résiste très longtemps à l'action de la chaleur et au frottement de la pierre à chaux. Le fond de la cuve est fermé par une double grille O à laquelle on peut accéder facilement par le côté pour le défournement de la chaux. La partie supérieure est munie d'un couvercle N et d'un carneau de dégagement des gaz M, comme dans le four du Theil. Le gazogène A est suffisamment éloigné de la cuve pour ne pas empêcher le refroidissement de la chaux cuite.

Le combustible est chargé par la bouche C, tandis qu'un regard B permet de surveiller la marche du foyer. Les gaz combustibles produits se rendent, par le conduit D, dans un carneau circulaire F et se répartissent entre les différents brûleurs G régulièrement espacés sur le périmètre du four; ils alimentent, en outre, un foyer central J, formé par un champignon percé latéralement d'ouvertures qui correspondent deux à deux à celles des brûleurs. Ce champignon est représenté en coupe horizontale et en coupe verticale sur les figures 22 et 23; il est supporté par un arceau en terre réfractaire reposant sur les parois du four. La marche de la combustion peut se régler, d'une part, au moyen du registre E placé sur le conduit principal D, et, d'autre part, à l'aide des registres H correspondant à chaque brûleur.

Cette disposition permet d'obtenir une chaleur intense et très régulièrement répartie dans la section du four correspondant aux brûleurs.

Un four de ce genre, construit à Champigny et ayant une capacité de 10 mètres cubes, produit 6 mètres cubes de chaux par vingt-quatre heures, avec une consommation moyenne de 208 kilogr. de coke pour 1000 kilogr. de chaux cuite.

FOURS MIXTES A BRIQUES ET A CHAUX.

Dans les fours intermittents, pour arriver à la calcination des couches supérieures, on perd inévitablement une grande quantité de chaleur qui s'échappe par le gueulard, notamment vers la fin de la cuisson d'une fournée. On a songé à utiliser cette chaleur perdue pour la cuisson des briques qui ne demande qu'une chaleur modérée. Dans certaines localités de l'Alsace, les fours qui servent à cette double cuisson sont de forme carrée. On construit à la base avec les plus grosses pierres trois voûtes ou chauffes en correspondance avec trois ouvertures pratiquées sur l'une des faces du four et on répand au-dessus une couche de calcaire de 0^m,50 à 0^m,60 d'épaisseur. La surface supérieure de cette couche est convenablement nivelée et on y dépose les briques en les entrecroisant les unes sur les autres et en laissant entre elles des intervalles de 15 millimètres pour donner un libre passage aux gaz.

On entretient à la base du four un feu de bois pendant 7 à 8 jours. La consommation relevée dans l'un de ces fours a été de 162 stères de bois pour la cuisson de 48 mètres cubes de chaux et de 50 000 briques de 320/160/68.

Une disposition aussi simple ne permet pas toujours d'obtenir des produits irréprochables. On comprend, en effet, que la couche de calcaire, en se tassant par l'effet de sa cuisson, doit produire des dérangements plus ou moins grands dans la position respective des briques et déterminer la déformation d'un certain nombre d'entre elles. On évite ces inconvénients en séparant la brique du calcaire par une voûte à claire-voie en briques réfractaires, laquelle divise le four suivant sa hauteur en deux compartiments.

Toutefois, ces deux cuissons simultanées, absolument dépendantes l'une de l'autre, ne peuvent que bien rarement réussir d'une manière complète; il faut presque toujours sacrifier l'une des fabrications à l'autre. Aussi, ces fours mixtes ne sont guère en usage que dans les localités où la consommation de la chaux et des produits en terre cuite (briques, tuiles, carreaux, etc.) serait trop faible pour donner lieu à la construction de fours distincts.

FOURS A CHAUX UTILISANT LA CHALEUR PERDUE DANS CERTAINES OPÉRATIONS INDUSTRIELLES.

On a souvent cherché à utiliser, pour la cuisson de la chaux, la chaleur perdue dans certaines opérations industrielles. En France, les quelques applications qui ont été faites dans ce sens ont principalement porté sur les hauts-fourneaux.

Le four à chaux était établi, dans ce cas, de manière que sa façade vint raser le bord du gueulard du côté opposé au chargement du haut-fourneau. Une ouverture verticale, pratiquée dans cette façade, immédiatement au-dessus de la plate-forme du gueulard et pouvant être fermée par une porte en fonte, était destinée à l'introduction de la flamme sortant du gueulard. Le four à chaux, de forme carrée, était ordinairement couvert et muni de cinq cheminées, une à chaque angle et une au centre un peu plus élevée; ces cheminées avaient pour but d'accélérer le tirage et principalement de forcer les gaz à se distribuer uniformément dans toutes les parties du four.

Le calcaire, une fois disposé dans le four comme à l'ordinaire, les plus gros morceaux occupant la partie inférieure, on soulevait le registre en fonte de manière à produire une ouverture de quelques centimètres par laquelle pénétrait une partie de la flamme; on obtenait ainsi le *petit feu* qu'on maintenait pendant un jour; en augmentant successivement l'ouverture de l'orifice, on arrivait progressivement au *grand feu* qui durait trois ou quatre jours. On laissait ensuite refroidir et l'on procédait au défournement de la chaux.

Ce mode d'utilisation des gaz sortant des hauts-fourneaux a perdu une grande partie de son intérêt, depuis qu'on les emploie pour la production de la force nécessaire à la soufflerie et pour le chauffage de l'air insufflé.

En Angleterre, on a également songé à utiliser, pour la cuisson des calcaires, la chaleur perdue des fours qui servent à la préparation du coke.

Les fourneaux à coke *a* (figures 24 et 25) sont, dans ce cas, accolés à un four à chaux *b* avec lequel ils communiquent par une série d'ouvertures, donnant issue aux produits de la combustion des parties bitumineuses et inflammables de la houille.

Le four à chaux se termine, à la base, par un cendrier recouvert d'une grille à barreaux mobiles, sur laquelle repose la pierre à calcaire. Quand la charge est ter-

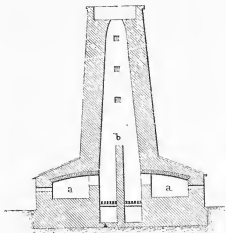


Fig. 24.

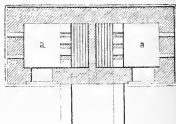


Fig. 25.

minée, on ferme l'ouverture du cendrier, soit avec des briques, soit avec une caisse en fer remplie de sable, afin d'empêcher tout accès d'air, autre que celui qui se fait par les ouvertures étroites, pratiquées dans les portes des fourneaux à coke. Lorsque la calcination atteint les $\frac{2}{3}$ environ de la masse, on débouche le cendrier, on enlève quelques barreaux de grille pour laisser descendre la chaux que l'on retire, puis on procède immédiatement au rechargement.

Ce mode d'utilisation, comme le précédent, ne se rencontre plus que rarement aujourd'hui.

On a proposé également, à différentes reprises, de combiner la cuisson de la chaux avec la marche de chaudières à vapeur et la distillation du gaz d'éclairage; mais aucun des dispositifs, essayés dans ce but, n'a donné de résultats satisfaisants.

AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES DIVERS SYSTÈMES DE FOURS.

La valeur des différents systèmes de fours, que nous venons de décrire, ne dépend pas seulement de leurs dispositions plus ou moins heureuses, il faut encore tenir grand compte des conditions spéciales à chaque localité et de l'importance de la fabrication.

Les fours intermittents présentent ce grave inconvénient qu'après chaque cuisson toute la chaleur conservée par les parois et par la chaux elle-même se trouve perdue; en outre, la cuisson des couches supérieures au degré convenable détermine une autre perte de chaleur assez notable due à la température élevée à laquelle les gaz doivent s'échapper par le gueulard. Le chargement de ces fours donne lieu à une main-d'œuvre assez coûteuse et doit être fait avec beaucoup de

soin, si l'on veut obtenir une cuisson très régulière; cette opération est d'autant plus pénible pour les ouvriers qu'elle doit souvent se faire avant le refroidissement complet des maçonneries.

Par contre, ces fours ont généralement des formes simples et sont d'une installation relativement peu coûteuse; ils permettent de régler la production d'après les fluctuations de la consommation et conviennent pour toutes les localités où les débouchés sont peu importants et variables avec les saisons.

Parmi les fours intermittents, ceux dans lesquels on stratifie le combustible avec le calcaire utilisent un peu mieux la chaleur, mais ils exigent que le calcaire soit en morceaux assez petits et donnent des produits de qualité un peu inférieure, en ce sens que la chaux se trouve mêlée à une certaine proportion de cendres qui peut, dans certains cas, atteindre 10 pour 100. Ce mode de calcination convient spécialement à la préparation des chaux destinées à l'agriculture et pour lesquelles la présence des cendres n'est plus un inconvénient.

Les fours continus présentent, sur les précédents, l'avantage d'une économie très notable de combustible. Suivant la nature du combustible dont on dispose, on devra recourir à l'un des modes de calcination à courte flamme ou à longue flamme; mais ce dernier sera toujours préférable au point de vue de la qualité de la chaux obtenue. Les fours continus n'exigent pas une durée de cuisson aussi longue que les fours intermittents et ont un rendement beaucoup plus élevé, mais il ne faut pas perdre de vue que les fours perfectionnés et notamment les fours à circulation, qui appartiennent à cette catégorie, donnent lieu à des dépenses d'installation très considérables et que, pour ce motif, ils doivent être réservés pour les cas où la consommation à laquelle il faut satisfaire est suffisamment importante et sans variations notables.

PHÉNOMÈNES DE LA CUISSON DES CHAUX.

1^{re} *Chaux grasses*. — Le seul résultat que l'on se propose d'atteindre par la cuisson des calcaires à chaux grasse est l'expulsion, aussi complète que possible, de l'acide carbonique combiné à la chaux; c'est donc une opération relativement simple et facile à diriger.

On doit toutefois éviter d'effectuer la calcination à une température trop élevée; M. Raoult¹ a constaté que la chaux pure, qui a subi une fois l'action d'une température supérieure à 1400°, ne se combine qu'avec une extrême lenteur avec l'acide carbonique.

Il le prouve par l'expérience suivante : Deux échantillons de chaux pure, de même poids, provenant de la décomposition de l'hydrate au rouge sombre, sont chauffés simultanément au rouge naissant dans un tube de porcelaine traversé par un courant lent d'acide carbonique. L'un d'eux a été préalablement porté, pendant une heure, à la température du rouge blanc (1400°) dans un creuset de platine. Au bout de 8 jours, ces deux échantillons ont absorbé des poids d'acide carbonique qui se trouvent à peu près dans le rapport de 1 à 2.

L'échantillon, calciné à température modérée, a absorbé 0,75 d'équivalent d'acide

1. *Annales de la construction*, mai 1881.

carbonique, tandis que celui qui a été chauffé au rouge blanc n'a absorbé que 0,40.

Cette différence semble devoir être la conséquence d'une modification dans l'état moléculaire; elle ne peut être attribuée à une porosité moins grande de la chaux calcinée, car elle se manifeste au même degré lorsque cette chaux a été réduite en poudre très fine.

2° *Chaux hydrauliques.* — La cuisson des calcaires à chaux hydraulique donne lieu, au contraire, à des phénomènes assez compliqués.

Ces calcaires peuvent renfermer du sable en grain de différentes grosseurs, de l'argile, de l'oxyde de fer; certains d'entre eux renferment de la magnésie, d'autres contiennent encore des matières bitumineuses, auxquelles se trouvent associées des pyrites de fer disséminées plus ou moins régulièrement dans la masse.

Si l'on porte ces calcaires à une température suffisante pour expulser l'acide carbonique, la chaux en excès décompose entièrement l'argile en produisant du silicate et de l'aluminate de chaux; elle agit de même sur le sable quartzeux, qui est plus ou moins attaqué suivant le degré de finesse des grains, mais elle n'exerce aucune action appréciable sur l'oxyde de fer.

Jusqu'ici, il n'a pas été possible de déterminer la composition du silicate et de l'aluminate de chaux formés pendant la cuisson; car, pour faire une analyse, il faut toujours commencer par dissoudre la chaux caustique dans un grand excès d'eau. Or, dans cette opération, on peut décomposer partiellement le silicate et l'aluminate de chaux et n'obtenir ainsi que leur composition modifiée par l'action de l'eau. Il est vrai de dire que, comme les chaux hydrauliques doivent être employées en présence de l'eau, la composition du produit de la cuisson, modifié par l'eau, a une importance plus grande que celle du même produit, immédiatement après la sortie du four.

L'analyse de nombreux échantillons a démontré que le silicate de chaux hydraté peut être représenté par la formule $\text{SiO}^5 + 3\text{CaO} + 6\text{HO}$. Quant à l'aluminate de chaux, sa composition semble se rapprocher de la formule $\text{Al}^2\text{O}^5 + 3\text{CaO}$; toutefois on n'a pas déterminé nettement la proportion d'eau qu'il retient, lorsqu'il s'hydrate en présence de l'eau en excès.

Lorsque l'on soumet à la cuisson des calcaires dolomitiques, comme la magnésie a sensiblement les mêmes affinités que la chaux pour la silice et l'alumine, on obtient des silicate et aluminate de magnésie, en même temps que des silicate et aluminate de chaux.

Quant aux calcaires pyriteux, le soufre qu'ils contiennent, en présence du grand excès d'air qui traverse les fours de cuisson, absorbe l'oxygène et donne lieu à du sulfate de chaux. La même réaction se produit naturellement lorsque l'on l'emploie comme combustible pour la cuisson des houilles sulfureuses.

Si le sulfate de chaux préexiste dans le calcaire, il n'est pas décomposé par l'argile, pendant la cuisson, grâce à la présence d'un excès de chaux libre.

Le degré de cuisson, auquel on soumet les calcaires à chaux hydraulique, a une grande influence sur les propriétés du produit obtenu; c'est ainsi que certaines chaux provenant d'une cuisson imparfaite peuvent offrir des caractères hydrauliques plus énergiques que des chaux, de même origine, parfaitement cuites.

Ce cas se présente, notamment, quand les calcaires contiennent de l'argile ou du sable très finement disséminé dans une forte proportion de carbonate de chaux, de telle sorte que l'action complète de la chaux sur la silice et sur l'alumine puisse se faire avant l'expulsion totale de l'acide carbonique. Dans ces conditions, en faisant varier le degré de cuisson, on pourra obtenir les mêmes quantités de silicate et d'aluminate de chaux, mais avec des quantités de chaux caustique très différentes, la décomposition du carbonate de chaux étant plus ou moins complète.

Dans les produits d'une cuisson modérée, en particulier, la proportion des matières susceptibles de faire prise (silicate et aluminate de chaux) par rapport à la chaux caustique sera plus grande que dans les produits d'une cuisson complète et, par suite, les caractères hydrauliques de la chaux obtenue se trouveront plus accentués.

Rendement de la pierre à chaux et retrait pendant la cuisson. — Si le carbonate de chaux était complètement sec et chimiquement pur, il donnerait 56 pour 100 de son poids de chaux caustique; mais ce rendement est soumis à des variations très étendues suivant la nature du calcaire. Tandis que la présence de l'eau et des matières organiques a pour résultat de diminuer ce rendement, les matières argileuses et siliceuses tendent, au contraire, à l'augmenter; c'est ce qui explique pourquoi ce rendement varie, suivant les cas, de 45 à 77 pour 100. Pour les calcaires à chaux grasses, il est en moyenne de 54 pour 100, c'est-à-dire que la perte en poids est de 46 pour 100.

Par la cuisson, le calcaire subit aussi une contraction qui est comprise ordinairement entre 10 et 20 pour 100 du volume primitif. Cette diminution s'évalue avec exactitude, en soumettant à la cuisson quelques briquettes de forme régulière.

DE LA CHAUX CUITE.

La chaux cuite, ou chaux vive, se trouve, à la sortie des fours, en partie à l'état de morceaux et en partie à l'état de débris et poussier. Elle présente une coloration jaunâtre ou grisâtre, sa cassure est terreuse. Elle est plus poreuse que le calcaire dont elle provient, et si elle a été cuite au degré convenable, elle doit fuser promptement et complètement dans l'eau.

Les chaux hydrauliques trop cuites, ou *chaux brûlées*, sont *paresseuses*, c'est-à-dire qu'elles exigent plusieurs heures, quelquefois même un jour ou deux, avant de s'éteindre.

La chaux est livrée, soit en pierres, comme elle sort des fours, soit en poudre, à l'état de chaux éteinte. Lorsqu'elle est livrée à l'état de chaux vive, son transport peut présenter quelques inconvénients; si, en effet, elle se trouve mouillée, en cours de transport, elle s'éteint partiellement et se gonfle au point d'exercer des poussées assez considérables sur les parois des véhicules. La chaux en pierres peut, en outre, donner lieu à un certain déchet par suite d'une proportion plus ou moins grande de parties incuites ou trop cuites, dont la présence ne peut guère être constatée qu'au moment de l'extinction.

On donne le nom de *biscuits* aux fragments de pierre qui ont été surchauffés et

celui de *pigeons*, ou *incuits*, à ceux dont le noyau est resté à l'état de carbonate de chaux.

Les biseuits ou ineuits sont encore indistinctement désignés sous le nom de *grappiers*.

Dans les grandes usines, la chaux est généralement éteinte à la sortie des fours et la poudre obtenue est passée dans des blutoirs qui retiennent les grappiers, ou toutes les parties qui ne renferment pas assez de chaux pour être réduites en poudre pour l'extinction.

Les grappiers sont quelquefois utilisés, soit pour augmenter l'hydraulicité d'une chaux, soit pour constituer un véritable ciment.

A l'usine du Theil, par exemple, la chaux, après extinction, passe sur un tamis ayant 40 000 mailles par décimètre carré; les grappiers recueillis sur ce tamis sont broyés sous des meules et de nouveau blutés. La poudre obtenue, dans ce second blutage, est mélangée aussi intimement que possible à la *fleur de chaux*, c'est-à-dire à la chaux débarrassée de grappiers, et vient améliorer la qualité de cette dernière. Quant au résidu de ce second blutage, il est broyé de nouveau, par deux fois, et fournit, après tamisage, une poudre qui est plus riche en argile que la chaux du Theil et qui est employée comme ciment à prise lente. Enfin, le résidu du dernier tamisage est constitué par une sorte de sable calcaire qui, mélangé avec du ciment, sert à la fabrication de pierres artificielles.

Les analyses qui ont été faites au laboratoire des Ponts et chaussées, sur les différents produits de la cuisson obtenus à l'usine du Theil, ont donné les résultats suivants :

| NATURE DES PRODUITS. | Silice. | Alumine et peroxyde de fer. | Chaux. | Magnésie. | Eau et produits non dosés. |
|--------------------------|---------|-----------------------------------|--------|-----------|----------------------------------|
| Fleur de chaux..... | 23,05 | 2,75 | 63,75 | 1,50 | 6,95 |
| Chaux marchande..... | 23,90 | 3,10 | 63,55 | 1,15 | 8,50 |
| Farine de grappiers..... | 51,85 | 4,25 | 55,60 | 1,20 | 7,10 |
| Résidu..... | 43,10 | 8,20 | 45,25 | 0,85 | 2,60 |

Ces chiffres montrent que les grappiers doivent principalement provenir, soit des parties de la roche plus riches en silice ou en argile, soit des fragments en contact avec les cendres du combustible, qui, grâce à un excès de cuisson, ont acquis des propriétés hydrauliques spéciales¹.

Influence du combustible sur les propriétés de la chaux. — La nature du combustible employé dans les fours ne paraît pas être sans influence sur la qualité et les propriétés de la chaux. MM. Donop et Deblinne ont fait, à ce sujet, un certain nombre d'expériences sur des pierres calcaires de diverses carrières, qu'ils ont calcinées, en employant successivement le bois, la tourbe et le charbon de terre; ils ont déduit de leurs expériences les conclusions générales suivantes :

1. Durand-Claye. — Cours de Chimie appliquée à l'École des Ponts et chaussées.

1° Les chaux calcinées avec le bois sont, en général, plus blanches ou moins colorées que celles cuites avec la tourbe et le charbon de terre ;

2° Les mêmes chaux, calcinées avec la tourbe, éteintes et mêlées en poids égal à un même volume d'eau, se précipitent presque toujours plus promptement que lorsqu'elles ont été calcinées avec le bois ;

3° Enfin, la calcination opérée par le charbon de terre donne une chaux qui se précipite très promptement, lorsque, ayant été éteinte, elle est étendue dans une certaine quantité d'eau.

Ces remarques peuvent être d'un certain intérêt au point de vue du choix de la chaux dans les arts. Dans la fabrication du savon, par exemple, il faudra employer, de préférence, celle qui se tient longtemps suspendue dans l'eau et par conséquent qui aura été calcinée avec le bois. Pour les constructions, la chaux lourde n'a, au contraire, aucun inconvénient, et il y a, d'autre part, un certain avantage à n'employer que de la chaux cuite, soit à la tourbe, soit au charbon de terre, parce que le poussier de la chaux calcinée avec ces deux espèces de combustibles ne contient jamais de cendres alcalines comme celui de la chaux cuite avec le bois, ce qui est préférable pour le mortier.

Composition chimique. — Nous avons déjà signalé l'influence prépondérante de la composition chimique des chaux hydrauliques sur leurs propriétés. Le tableau qui suit donne les résultats de l'analyse d'un certain nombre d'entre elles avec les indices d'hydraulicité correspondants. Ces résultats ont été obtenus par M. Durand-Claye sur des échantillons présentés à l'Exposition universelle de 1878.

| PROVENANCE DES CHAUX. | Silice combinée. | Alumine. | Chaux. | Sable siliceux. | Peroxyde de fer. | Magnésie. | Acide sulfurique. | Perte au feu et divers. | Indice d'hydraulicité. |
|--|------------------|----------|--------|-----------------|------------------|-----------|-------------------|-------------------------|------------------------|
| De la Nerthe..... (Bouches-du-Rhône). | 10,94 | 2,65 | 63,35 | 0,40 | 2,95 | 0,50 | 0,25 | 18,95 | 0,21 |
| De Beaune..... (Côte-d'Or). | 15,85 | 1,75 | 60,90 | 0,85 | 1,55 | 0,70 | 0,20 | 20,40 | 0,26 |
| De Doué..... (Maine-et-Loire). | 14,35 | 2,90 | 63,85 | » | 2,20 | 0,80 | 0,40 | 15,58 | 0,27 |
| De la Grave près Échoisy... (Charente). | 11,70 | 4,60 | 59,20 | » | 2,50 | 1,40 | » | 20,80 | 0,28 |
| Des Moulineaux..... (Seine). | 12,90 | 5,75 | 58,85 | » | 2,85 | 0,50 | 0,50 | 18,65 | 0,32 |
| Du Seilley à Ville-s.-la-Ferté. (Aube). | 14,10 | 5,50 | 60,50 | » | 2,00 | 1,70 | » | 15,60 | 0,32 |
| De Beffes..... (Cher). | 15,50 | 4,25 | 61,35 | 1,35 | 3,20 | 1,05 | 0,45 | 12,85 | 0,52 |
| Du détroit du Theil... (Ardèche). | 19,05 | 1,60 | 63,10 | 0,50 | 0,55 | 0,65 | 0,50 | 12,45 | 0,52 |
| De l'Homme-d'Armes..... (Drôme). | 19,70 | 0,75 | 63,55 | 0,15 | 1,10 | 0,60 | 0,50 | 15,85 | 0,52 |
| Des Louvières..... (Marne). | 15,80 | 6,70 | 65,00 | 0,55 | 2,40 | 0,45 | 0,50 | 15,00 | 0,55 |
| De Lougchaups..... (Aube). | 14,35 | 4,45 | 56,65 | » | 4,40 | 1,00 | 0,45 | 18,70 | 0,55 |
| De Saint-Aule..... par Viviers (Ardèche). | 16,50 | 5,95 | 58,00 | 0,85 | 2,45 | 0,65 | 2,60 | 15,20 | 0,55 |
| De la Gravière..... près Mussy-s.-Seine (Aube). | 15,80 | 5,05 | 58,90 | 1,65 | 2,70 | 0,25 | 0,50 | 15,55 | 0,56 |
| De Cruas..... (Ardèche). | 21,60 | 2,00 | 65,80 | 0,50 | 1,25 | 0,55 | 0,15 | 8,55 | 0,56 |
| De Bougival..... (Seine-et-Oise). | 16,55 | 5,03 | 57,80 | » | 2,10 | 1,00 | 1,05 | 16,50 | 0,57 |
| De Saint-Astier..... (Dordogne). | 21,85 | 1,55 | 62,25 | » | 2,85 | 1,05 | 0,50 | 10,15 | 0,57 |
| De Romainville... (Seine). | 16,15 | 5,80 | 57,40 | 0,55 | 2,60 | 1,50 | 0,90 | 15,50 | 0,58 |
| De Senonches... (Eure-et-Loir). | 21,60 | 1,60 | 61,10 | » | 1,50 | 1,70 | » | 12,70 | 0,58 |
| De Lafarge-du-Theil..... (Ardèche). | 25,15 | 1,72 | 65,76 | » | 0,75 | 0,97 | » | 9,69 | 0,59 |
| De Lormandière..... (Ille-et-Vilaine). | 11,40 | 12,25 | 59,55 | 1,15 | 2,50 | » | 1,70 | 1,45 | 0,40 |
| De Paviers..... (Indre-et-Loire). | 25,00 | 2,05 | 61,50 | » | 1,05 | 0,65 | » | 11,75 | 0,40 |
| D'Argenteuil..... (Seine-et-Oise). | 17,85 | 5,20 | 56,80 | » | 2,40 | 1,55 | 1,50 | 14,90 | 0,40 |
| Des Moulmeaux (2 ^e variété). (Seine). | 19,45 | 5,00 | 57,80 | 2,40 | 5,15 | 0,55 | 0,75 | 10,90 | 0,42 |
| De Renteils près Albi... (Tarn). | 17,55 | 5,60 | 51,55 | 3,75 | 2,45 | 2,60 | 0,50 | 16,20 | 0,45 |
| De Virieu-le-Grand..... (Ain). | 19,90 | 5,75 | 56,10 | 2,50 | 2,70 | 1,50 | 1,00 | 10,55 | 0,46 |
| De Contes-les-Pins..... (Alpes Maritimes). | 22,55 | 5,00 | 57,75 | » | 2,60 | 0,60 | 1,55 | 10,15 | 0,48 |
| Des tours Saint-Bernard... à la Ville-s.-la-Ferté (Aube). | 20,25 | 7,50 | 54,15 | 0,10 | 2,50 | 0,60 | 0,25 | 14,85 | 0,50 |
| D'Albi..... (Tarn). | 19,60 | 6,50 | 49,40 | 5,60 | 2,60 | 5,75 | 0,55 | 12,40 | 0,52 |

CONSERVATION DES CHAUX.

1° *Chaux vives.* — Pour conserver les chaux en pierres, on en éteint, d'abord, par immersion, une quantité suffisante pour former une couche de 15 à 20 centimètres que l'on étend sur le sol d'un hangar bien sec. Sur cette couche, on entasse la chaux vive à l'aide d'une masse de bois, afin de diminuer les vides entre les pierres. On termine le tas par des talus peu inclinés et on le recouvre d'un lit de chaux, prise au moment où elle vient de subir l'immersion; celle-ci, en tombant en poussière, se loge en partie dans les interstices des pierres et reste en partie au-dessus. On lisse avec le dos d'une pelle cette espèce de manteau, qui doit avoir une quinzaine de centimètres d'épaisseur, de manière à intercepter, autant que possible, la pénétration de l'air humide dans l'intérieur du tas; par surcroît de précaution, on peut encore en recouvrir la surface avec des vieilles toiles. La chaux vive peut être conservée ainsi pendant cinq à six mois; au bout de ce temps, la poudre enveloppante est seule passée sur une faible épaisseur à l'état de chaux carbonatée.

2° *Chaux éteinte en poudre.* — Les chaux éteintes en poudre se conservent bien plus facilement que les chaux vives; la seule précaution à prendre consiste à tasser la poudre dans des encaissements établis sous des hangars secs et à la recouvrir de vieilles toiles ou de paillassons.

On les conserve également, à l'abri de l'humidité, dans des sacs ou mieux encore dans des futailles doublées de papier qui ont servi à leur expédition.

5° *Chaux en pâte.* — Les chaux hydrauliques, à l'état de pâte, ne peuvent être conservées, car elles durcissent si rapidement qu'au bout de quelques jours il ne serait plus possible de les broyer, il faut généralement les employer le lendemain ou, au plus tard, le surlendemain de leur extinction.

Les chaux grasses en pâte se conservent, au contraire, indéfiniment à l'abri de l'air et de l'eau. Une simple couche de sable ou de terre fraîche de 0^m,20 à 0^m,50, étendue sur les bassins d'extinction, suffit pour les protéger.

Lors du déblaiement des mines du château de Landsberg, près de Meiningen, on a découvert, sous une voûte, une fosse à chaux d'assez grandes dimensions qui avait été abandonnée. La surface de cette chaux, éteinte depuis trois cents ans, s'était carbonatée à quelques centimètres de profondeur; mais le reste se trouvait dans le même état que de la chaux fraîchement éteinte; elle était seulement un peu sèche.

FABRICATION DES CHAUX HYDRAULIQUES ARTIFICIELLES.

Après avoir constaté que les chaux hydrauliques résultent de la cuisson de calcaires associés naturellement à l'argile, Vicat fut conduit à préparer des produits similaires au moyen de mélanges artificiels formés de proportions déterminées d'argile et de calcaire tendre ou simplement d'argile et de chaux.

De là, deux procédés différents, indiqués par Vicat, qui tous deux ont été appliqués et ont permis à l'industrie de fabriquer des chaux hydrauliques artificielles, jouissant des mêmes propriétés que les chaux hydrauliques naturelles.

Le premier procédé, dit *procédé de la simple cuisson*, consiste à faire un mélange de calcaire tendre réduit en bouillie avec de l'argile, dans la proportion convenable pour obtenir le degré d'hydraulicité nécessaire, et à soumettre ensuite le mélange à la cuisson.

Les calcaires, qui conviennent le mieux pour cette fabrication, sont ceux qui, faciles à pulvériser, sont en même temps susceptibles de former avec l'eau une pâte fine et liante, comme des craies, des tufs; les calcaires marneux, qui renferment déjà une certaine proportion d'argile, conviennent également très bien et l'on n'a, dans ce cas, qu'à ajouter la quantité d'argile formant le complément nécessaire de celle qui existe dans la marne.

L'argile employée doit être aussi pure que possible et délayée comme le calcaire avec de l'eau. La pâte liquide, formée par la réunion des deux substances, est soumise à une trituration énergique afin d'obtenir un mélange aussi intime que possible; cette opération s'opère, ordinairement, dans des bassins circulaires pleins d'eau, au moyen de meules en grès, et se continue jusqu'à ce que les matières forment une bouillie liquide bien homogène; on fait écouler cette bouillie dans une série d'auges étagées qui communiquent entre elles par des déversoirs et dans lesquelles se précipite le mélange de calcaire et d'argile. Lorsque le mélange a pris dans les auges une consistance suffisante, on découpe la pâte en briquettes que l'on fait sécher au soleil ou sur des étagères couvertes. On les y laisse jusqu'à ce qu'elles soient parfaitement sèches et on les soumet ensuite à la cuisson qui s'effectue, d'ailleurs, comme pour les chaux naturelles; c'est la méthode qui a été adoptée à l'usine de M. de Saint-Léger à Meudon, en employant un mélange de 4 parties en volume de craie de Meudon et d'une partie d'argile de Passy ou de Vanves. L'analyse de la chaux obtenue dans cette usine a donné la composition suivante :

| | | | | | |
|------------------------|-------------------|-------|---|-----------|---------|
| Argile | { Silice. | 15,86 | } | | 25,79 |
| | { Alumine | 7,93 | | | |
| Chaux | | | | | 74,61 |
| Oxyde de fer | | | | | 1,60 |
| | | | | | 100, .. |

Composition qui correspond à un indice d'hydraulicité égal à 0,51. Lorsque l'on ne dispose pas de calcaires faciles à pulvériser, on a recours au *procédé de la double cuisson*, qui consiste à mélanger l'argile, en proportion convenable, soit avec une chaux grasse, soit avec une chaux médiocrement hydraulique amenée à l'état de pâte; les matières, convenablement corroyées, sont moulées en briquettes et soumises, après dessiccation, à une seconde calcination dans un four à chaux ordinaire.

D'après Vicat, avec les chaux ordinaires, très grasses, on peut ajouter environ 20 parties d'argile pour 100 de chaux; 10 à 15 parties suffisent pour les chaux moyennement grasses; enfin pour les chaux maigres, qui présentent déjà quelques qualités hydrauliques, il convient de n'ajouter que 6 à 7 pour 100 d'argile. Il est, d'ailleurs, essentiel de fixer, dans chaque cas, ces proportions d'après les résultats

d'analyses préalables. Le procédé de la double cuisson, plus dispendieux que le premier, donne, en général, des produits de qualité supérieure que l'on peut comparer aux meilleures chaux hydrauliques naturelles. Il importe, pour obtenir une bonne fabrication, que le mélange des matières soit aussi homogène que possible et que la marche du feu, pendant la cuisson, soit surveillée avec le plus grand soin, de manière à ne point trop dépasser la température nécessaire pour le dégagement de l'eau et de l'acide carbonique.

FABRICATION DES CIMENTS

Ciments naturels. — En 1796, James Parker obtint une patente royale pour l'exploitation des calcaires argileux des environs de Londres, avec lesquels il avait obtenu un produit, non susceptible de s'éteindre comme la chaux hydraulique, mais à prise beaucoup plus rapide.

A peu près à la même époque, un ingénieur militaire français, Lesage, appelait l'attention des constructeurs sur les propriétés hydrauliques de la matière que l'on obtenait par la cuisson du calcaire compact composant les galets de Boulogne-sur-Mer, matière à peu près identique au ciment de Parker et qu'on désigna sous le nom de *plâtre-ciment*.

Plus tard, on découvrit, en France et dans les autres pays, un grand nombre de calcaires propres à la fabrication des ciments, et ces découvertes ont donné naissance à d'importantes exploitations.

La cuisson des pierres à ciment, simplement concassées en fragments de 0^m,06 à 0^m,08, s'effectue comme celle des pierres à chaux ; mais il est essentiel, pour obtenir des produits de qualité toujours constante, de surveiller incessamment la marche du feu et les progrès de la calcination.

Au sortir du four, la pierre calcinée n'étant pas susceptible de s'éteindre, il est nécessaire de la broyer et de la réduire en poudre aussi fine que possible, afin de la rendre propre à être gâchée avec l'eau.

Malgré tous les soins apportés à la cuisson, les fragments de calcaire ne sont pas tous exposés à la même température, et comme, d'un autre côté, les calcaires naturels employés n'ont pas eux-mêmes une homogénéité parfaite, on peut obtenir, à la sortie des fours, un mélange de fragments à des états très divers (chaux hydraulique, ciment à prise lente, ciment à prise rapide). Chacun de ces produits, pris isolément, jouit de propriétés spéciales qui peuvent être utilisées dans les constructions, mais leur mélange intime ne donne ordinairement qu'un produit d'assez médiocre qualité.

Pour ce motif, on effectue souvent un triage après la cuisson. A l'usine de la Porte de France, en particulier, ce triage donne deux produits différents : un ciment à prise lente et un ciment à prise rapide. Il s'effectue d'après l'aspect des morceaux à la sortie des fours ; on met de côté les ineuits ainsi que les parties blanchâtres, trop riches en chaux pour donner du ciment ; puis on sépare les morceaux scoriifiés de ceux qui sont simplement agglutinés. Les premiers, qui ont été soumis à une température plus élevée, donnent le ciment à prise lente, tandis que les autres fournissent le ciment à prise rapide. Ce dernier produit est ordi-

nairement obtenu en quantité trois fois plus grande que le ciment à prise lente.

L'analyse de ces deux espèces de ciment a donné les résultats suivants :

| COMPOSITION. | | Ciment à prise rapide. | Ciment à prise lente. |
|-----------------------|--------------|------------------------|-----------------------|
| Argile { | silice..... | 22,40 | 22,61 |
| | alumine..... | 48,21 | 49,79 |
| | | 40,34 | 42,40 |
| Oxyde de fer..... | | Traces. | Traces. |
| Chaux..... | | 55,98 | 51,65 |
| Magnésie..... | | 0,37 | 0,37 |
| Sulfate de chaux..... | | 5,54 | 5,60 |
| | | 400 | 400 |

Le ciment à prise lente contient donc un peu moins de chaux, mais une plus forte proportion de silice et d'alumine combinés.

Nous avons indiqué précédemment comment on utilisait les grappiers à l'usine du Theil. La partie de ces grappiers tamisée, après un premier broyage, est mélangée à la fleur de chaux pour en augmenter l'hydraulicité, et le résidu de ce tamisage, de nouveau broyé sous des meules et soumis à un second blutage, sert à faire un ciment à prise lente qui résiste très bien à la mer.

C'est sur ce même principe qu'est basé le procédé de fabrication du ciment indiqué par M. Judycki, qui dirigeait la fabrication de la chaux hydraulique à Saint-Michel (Savoie) pour le tunnel du mont Cenis. Il consiste à soumettre à la cuisson, dans des fours à chaux ordinaires, un calcaire marneux plus ou moins homogène. Après le défournement, on arrose les fragments de la pierre calcinée et on les laisse fuser pendant 8 à 10 jours. Au bout de ce temps, les parties, à l'état de chaux, sont réduites en poudre, et en tamisant on recueille sur le tamis les parties cimentueuses. Celles-ci doivent être soumises à une nouvelle cuisson dont le but est de chasser l'eau d'hydratation qu'elles ont absorbée ; mais, comme les parties sont très ténues, il faut avoir soin, pour ne point étouffer le feu, de garnir la grille de matériaux réfractaires quelconques et de diviser en outre la charge par des cheminées verticales remplies de poussier de charbon de bois et reliées entre elles à des intervalles de 0^m,50 par des traînées horizontales de ce même combustible.

Ce procédé de fabrication donne ainsi à la fois du ciment et de la chaux hydraulique. M. Judycki a obtenu les résultats suivants :

Avec un calcaire contenant 10 à 16 pour 100 d'argile, la proportion de ciment fabriqué était de 10 à 25 pour 100.

Avec un autre calcaire contenant 16 à 22 pour 100 d'argile cette proportion pouvait s'élever de 25 à 50 pour 100¹.

Ciment artificiel. — Par suite du développement rapide qu'a pris l'emploi du ciment dans les constructions et en présence du nombre limité des roches naturelles capables de donner des ciments par la cuisson directe, on a été amené à

chercher les moyens de les obtenir, comme les chaux hydrauliques, au moyen de mélanges artificiels de calcaires et d'argiles en proportions convenables. La fabrication du ciment artificiel n'est toutefois devenue industrielle qu'assez longtemps après celle des chaux hydrauliques artificielles, en raison de certaines précautions indispensables dans la préparation des mélanges, précautions qui n'avaient pas été tout d'abord observées. Aujourd'hui, la fabrication des ciments artificiels a pris une grande extension et est devenue aussi courante et aussi pratique que celle des chaux hydrauliques; on peut même dire qu'elle tend de plus en plus à se substituer à la fabrication des ciments naturels, car il est rare de rencontrer des bancs d'une composition convenable assez étendus et assez homogènes pour alimenter longtemps une fabrication de ce genre. En général, il est nécessaire d'analyser le calcaire à chaque fournée et de lui ajouter ce qui lui manque pour obtenir les proportions reconnues les plus convenables.

La première condition à remplir pour organiser une fabrication de ciment artificiel est de faire un choix judicieux des matières premières à employer. Dans le choix des calcaires, on doit, comme pour la fabrication des chaux hydrauliques artificielles, laisser de côté toutes les espèces dures ou trop résistantes, en raison des difficultés et des frais qu'entraînerait leur pulvérisation. Quant à l'argile, l'expérience a démontré qu'il convenait de faire choix d'une argile riche en silice et renfermant en outre une petite proportion d'alcalis, 3 à 4 pour 100. L'argile bleue déposée par le Meslay, affluent de la Tamise et qui, mélangée à la craie, donne un excellent ciment, est ordinairement proposée comme type. Sa composition est la suivante :

| | |
|-----------------------|-------------|
| Silice. | 68,45 |
| Alumine | 11,64 |
| Oxyde de fer. | 14,80 |
| Chaux | 0,75 |
| Potasse. | 1,90 |
| Soude | 2,10 |
| Total. | <hr/> 99,64 |

Il convient de remarquer que l'oxyde de fer qui se rencontre, en notable proportion, dans cette argile, n'a, contrairement à l'avis de Pasley, qu'une importance très secondaire sur la stabilité des mortiers de ciment.

Lorsqu'on a fait choix d'un calcaire et d'une argile, il faut les mélanger d'une manière aussi intime et aussi uniforme que possible. La parfaite homogénéité du mélange est une condition essentielle de succès; c'est pour l'avoir trop négligée, à l'origine, que la préparation des ciments artificiels n'est pas devenue immédiatement une fabrication industrielle. Une seconde condition, non moins essentielle, est relative au dosage des matières; il faut avoir grand soin de tenir compte de leur teneur en eau au moment du mélange et, comme cette teneur peut varier entre des limites assez éloignées, il convient de la déterminer par des expériences directes et fréquentes.

MÉLANGE DES MATIÈRES PAR VOIE HUMIDE.

Le mélange et la pulvérisation des matières s'effectuent ordinairement par lévigation dans un bassin où l'on fait arriver les matières avec de l'eau et où se meuvent des râtaux ou des herses animés d'une grande vitesse.

Les figures 6 et 7, planche II, représentent un modèle de mélangeur ou malaxeur. Le bassin E a la forme d'une auge circulaire et est construit en pierres très dures. Au centre est placé un arbre vertical B, actionné par une machine à vapeur et tournant à une vitesse de 10 à 12 tours par minute. Sur cet arbre se trouve monté le râteau, qui se compose d'une forte traverse en bois C sur laquelle sont implantées des barres de fer verticales.

L'auge présente sur l'un des côtés une ouverture faisant office de trop-plein, dont la figure 8 fournit une coupe suivant xy . La vague de boue claire que soulève le râteau dans son mouvement se déverse par cette ouverture, qui est d'ailleurs munie d'une toile métallique D pour retenir toutes les parties qui ne sont pas suffisamment fines.

Les sables, graviers ou noyaux résistants, contenus dans les matières employées, restent au fond de l'auge, d'où on les extrait pendant les interruptions de travail.

Les matières calcaires et argileuses sont versées dans le bassin, d'une manière continue et régulière pendant la marche de l'appareil. L'eau y est amenée en même temps, sans interruption, par un tuyau d'alimentation.

Cette opération du chargement exige une attention continuelle pour arriver à une composition sensiblement constante, condition essentielle du succès de toute fabrication. On ne peut se borner à mesurer les matières en volume, il faut encore prélever, à des intervalles très rapprochés, des échantillons du lait argilo-calcaire sortant du bassin et les soumettre à des analyses sommaires, de manière à corriger, en temps utile, les erreurs de dosage.

Le lait argilo-calcaire, à la sortie du malaxeur, se déverse dans des bassins présentant une grande surface d'évaporation. Lorsqu'un bassin se trouve rempli, on ferme la vanne d'arrivée et l'on abandonne le liquide au repos, de manière à laisser les matières solides se déposer au fond; puis on fait écouler le liquide clarifié en ouvrant une petite vanne de décharge. On amène alors une nouvelle quantité d'eau trouble qui dépose une seconde couche de matière solide et on continue ainsi jusqu'à ce que le bassin soit rempli. Le nombre et les dimensions des bassins de dépôt varient naturellement avec l'importance de la fabrication. En général, on admet qu'ils doivent avoir une capacité suffisante pour contenir un approvisionnement de soixante jours de travail environ.

Lorsque le dépôt a acquis la consistance d'une pâte molle, on le brasse énergiquement à l'aide de griffes en fer, afin de lui rendre l'homogénéité qu'a pu lui faire perdre la précipitation des matières solides par ordre de densités et de corriger, en même temps, les petites erreurs de dosage. Dans certaines usines, les bouillies, au sortir du malaxeur, passent dans des bassins spéciaux appelés *bassin de dosage*, où les boues sont maintenues en suspension au moyen d'un arbre à palettes, animé d'un mouvement de rotation. Le mouvement étant plus lent que dans les mélan-

geurs, le sable entraîné avec la boue achève de se déposer et il ne reste en suspension que des parties très fines. On puise, dans chacun de ces bassins, un échantillon de la boue liquide et on le soumet à l'analyse. Dans les bassins où cette analyse dénote une insuffisance d'argile, on fait passer une partie du contenu de ceux où l'argile est en excès. C'est au sortir de ces bassins de dosage que les matières sont amenées dans les bassins de desséchement. Après un séjour plus ou moins long, la pâte s'est suffisamment affermie pour qu'il soit possible d'en former des briquettes; on achève la dessiccation de celles-ci, soit à l'air libre, sous des hangars, soit dans des étuves spéciales, à travers lesquelles on établit une circulation d'air chaud ou de vapeur.

On utilise souvent, pour cette opération, les gaz du foyer où l'on transforme la houille en coke pour la cuisson.

MÉLANGE DES MATIÈRES PAR VOIE SÈCHE.

Au lieu d'effectuer le mélange des matières *par lévigation*, conformément au procédé que nous venons de décrire, on peut également, d'après les indications de M. Lipowitz, recourir au mode de préparation *par voie sèche*. Dans cette méthode, les matières à employer sont d'abord desséchées, aussi complètement que possible, dans des fours, puis pulvérisées isolément sous des meules. Elles sont alors versées, en proportions convenables, dans un malaxeur analogue à celui qui sert à fabriquer le mortier et où l'on ne fait arriver qu'une très faible quantité d'eau.

La pâte, obtenue par le malaxage, sort directement de l'appareil sous forme de briquettes, qu'il suffit de sécher, comme dans le procédé précédent, avant de les soumettre à la cuisson.

Dans cette méthode, le dosage des matières se faisant à l'état sec, on évite en grande partie les causes d'erreur indiquées précédemment, et, si les matières étrangères associées à l'argile et à la chaux, telles que : sable, oxyde de fer, etc., sont en proportions très faibles, les variations de composition sont négligeables.

La suppression des bassins de dépôt, qui résulte également de l'application de cette méthode, a, en outre, l'avantage d'éviter des pertes de temps et d'espace. Par contre, la force dépensée pour mettre en mouvement les appareils de broyage est plus considérable et la consommation de combustible, pour la dessiccation préalable des matières, est assez importante; enfin, ce qui est encore plus important, la préparation des matières à sec et leur trituration avec une faible quantité d'eau ne semble pas donner un mélange aussi intime que le délayage et l'agitation à grande eau. Pour ces motifs, la méthode de préparation, par voie sèche, ne peut être appliquée, avec avantage, que dans les circonstances, d'ailleurs assez rares, où la place pour les bassins de dépôt serait complètement défaut.

CUISSON DES BRIQUETTES.

Quel que soit le mode de préparation des briquettes, elles acquièrent par le séchage une assez grande dureté. On les concasse alors en fragments assez petits pour

passer dans un anneau de 7 à 8 centimètres de diamètre et on les soumet à la cuisson, en apportant les mêmes soins et la même surveillance que pour la cuisson des ciments naturels.

Les ciments de Portland doivent être cuits à une température assez élevée comprise entre le rouge vif et le blanc. La cuisson, en effet, n'a pas seulement pour but de chasser l'acide carbonique du calcaire, elle doit encore déterminer un commencement de vitrification qui résulte de la combinaison de la chaux avec les éléments de l'argile. Cette combinaison, qui rend la silice soluble dans les acides, ne s'opère complètement qu'à la température du rouge vif. Si la matière était portée à une température plus élevée, elle finirait par arriver à l'état de fusion complète et perdrait la faculté de durcir sous l'eau.

Le retrait considérable de la matière pendant la cuisson et surtout le commencement de fusion qu'elle éprouve n'ont pas permis jusqu'ici de recourir à l'emploi des fours coulants, analogues à ceux en usage pour la fabrication de la chaux et de certains ciments à prise rapide.

Les essais tentés avec ces fours n'ont toujours donné que de médiocres résultats, parce que les fragments de briquettes, dès qu'ils ont atteint le degré de cuisson nécessaire, se collent entre eux aussi bien que contre les parois du four; de telle sorte que, quand on vient à soutirer les morceaux cuits, les briquettes agglutinées ne descendent pas ou descendent irrégulièrement.

De même, les combustibles à longue flamme ne conviennent pas pour ce genre de cuisson, parce qu'ils ne produisent pas une chaleur assez intense dans toutes les parties du four. Pour ces motifs, la plupart des usines à ciment de Portland ont dû adopter le système de four intermittent à courte flamme.

L'acide sulfurique et les sulfures exerçant une action très nuisible sur la qualité des ciments, il faut éviter avec soin l'emploi de combustibles renfermant du soufre; c'est pourquoi généralement on emploie le coke de préférence à la houille. La consommation est d'environ 200 à 250 kilos de coke par tonne de ciment cuit.

DISPOSITION DES FOURS.

Les fours à ciment, se trouvant exposés à une température beaucoup plus élevée que les fours à chaux, doivent être établis dans des conditions de solidité particulières. Ils doivent être fortement contreventés à l'extérieur et, au besoin, consolidés par des armatures en fer. A l'intérieur, ils présentent un revêtement en briques réfractaires que l'on recouvre d'un enduit formé de la pâte qui sert à la préparation des briquettes à ciment. Cet enduit, que l'on renouvelle de temps en temps, augmente la durée du revêtement en briques réfractaires et empêche, en même temps, l'adhérence de la masse du ciment avec les parois du four.

La capacité des fours dépend de l'importance de la fabrication; ceux qu'on emploie le plus généralement peuvent fournir de 25 à 50 tonnes de ciment par cuisson. La durée de la cuisson varie, suivant la contenance du four, de 24 à 50 heures; celle du refroidissement est de 2 à 3 jours.

Les fours à cuve employés pour cette fabrication sont ordinairement composés de deux troncs de cône superposés sur leur grande base.

Dans ceux de l'usine de MM. Demarle et Lonquety à Boulogne-sur-mer (figure 5, planche II), la cuve proprement dite est composée d'une partie cylindro-conique, surmontée d'un dôme de forme ovoïde qui constitue, au-dessus de la charge, une chambre de combustion destinée à assurer une élévation suffisante de la température. Les charges successives de coke et de briquettes concassées sont amenées à la naissance du dôme, et sont introduites dans le four par une ouverture pratiquée dans la voûte à cette hauteur.

La perte de chaleur par les fours intermittents est relativement très considérable, et, comme la cuisson est un des éléments principaux dans les frais de fabrication des ciments à prise lente, on comprend tout l'intérêt que présentent les essais tentés en vue de diminuer la consommation du combustible.

A l'usine de M. Campbell à Wouldham-Valley (Angleterre), les fours représentés sur les figures 3 et 4, planche II, sont recouverts, à la partie supérieure, d'un chapeau à double paroi, et les gaz, recueillis sur le pourtour du gueulard, comme dans les fours du Thcil, sont amenés, par un caniveau B, sur un feu de coke P où l'on fait arriver en même temps, au moyen d'un ventilateur V, un courant d'air suffisant pour achever la combustion des gaz, lesquels contiennent une forte proportion d'oxyde de carbone.

Les produits de cette combustion, avant de se dégager dans la cheminée, circulent dans des carneaux établis au-dessous d'un plancher sur lequel on empile les briquettes pour en opérer la dessiccation. A la sortie des carneaux, les gaz traversent une petite chambre Q remplie de coke mouillé, où ils abandonnent une partie de l'acide sulfureux qu'ils contiennent. On utilise, de cette manière, la puissance calorifique des gaz qui sortent des fours et on les épure, en même temps, avant de les rejeter dans l'atmosphère.

Lipowitz, dans son *Traité pratique sur la fabrication du ciment de Portland*, donne la description d'un four à circulation qui offrirait sur les fours intermittents le double avantage d'une économie de combustible et d'une plus grande régularité dans la cuisson.

Ce four a beaucoup d'analogie avec les fours de Light et Hoffmann, dont nous avons parlé à propos de la calcination de la chaux. Les principaux perfectionnements apportés sont les suivants :

1° Le massif du four a, en plan, une forme oblongue, au lieu de la forme circulaire, ce qui a pour résultat de rendre l'installation moins coûteuse.

2° Le tirage est déterminé par des ventilateurs. On peut ainsi utiliser la majeure partie de la chaleur des gaz pour l'échauffement de la pierre à ciment et régler le tirage suivant la marche de la combustion. Grâce à ces appareils, la mise en feu ne présente pas non plus les mêmes difficultés que dans les fours de MM. Light et Hoffmann.

Broyage et pulvérisation. — Au sortir des fours, les fragments de ciment sont triés et on rejette tous ceux dont la cuisson ne semble pas bonne. Ces derniers sont faciles à reconnaître à leur aspect, à leur teinte jaunâtre et à leur faible densité. Les morceaux de bonne qualité sont soumis au concassage, opération qui se fait à l'aide d'appareils de divers systèmes : concasseur Carr, concasseur américain, moulin à noix, cylindres broyeurs. Ce dernier appareil est adopté dans un grand

nombre d'usines ; les cylindres sont, dans ce cas, formés d'une série de rondelles dentées en fer aciéré, montées sur un fort arbre à section carrée.

Quel que soit le mode de concassage, la matière réduite en fragments suffisamment petits est portée au moulin qui doit la convertir en poudre impalpable. Celui-ci est un moulin à meules horizontales disposées exactement comme celles d'un moulin à farine ordinaire. Les meules ont de 1^m,20 à 1^m,50 de diamètre et sont animées d'une vitesse de 100 à 120 tours par minute. Chaque paire de meules exige une force de 6 à 8 chevaux et peut pulvériser 12 à 15 tonnes de ciment en 12 heures.

En sortant des meules, la poudre produite passe dans une bluterie ordinaire garnie de toile métallique qui sépare les parties trop grossières. Le ciment, après ce tamisage, est prêt à être ensaché ou mis en barils pour l'expédition.

PROPRIÉTÉS, ESSAIS DES CEMENTS.

Ciment à prise rapide ou ciment romain. — Les ciments à prise rapide, broyés à la sortie des fours et réduits en pâte avec l'eau, font prise instantanément ; si on les laisse exposés à l'air, ils s'éventent peu à peu et perdent une partie de leur énergie. Leur densité est de 0,9 environ. On les distingue en *ciments limites inférieurs* ou ciments gras et en *ciments limites supérieurs* ou ciments maigres. Les premiers ont un indice d'hydraulicité inférieur à 1,20, ils font prise dans un espace de temps qui varie de 2 à 10 minutes et acquièrent une grande dureté. Mêlés à l'eau, ils forment une pâte assez liante pour que l'on puisse leur ajouter une certaine proportion de sable.

Les ciments limites supérieurs ont un indice d'hydraulicité compris entre 1,20 et 5,00. Immédiatement après la cuisson, ils font prise avec une rapidité telle qu'il ne serait pas possible de les employer ; il faut nécessairement les laisser éventer en partie pour en faire usage. Ils ne fournissent d'ailleurs avec l'eau qu'une pâte maigre, à laquelle on ne peut ajouter qu'une faible proportion de sable ; leur cohésion finale est d'autant plus faible qu'ils renferment plus d'argile.

Tous ces ciments présentent des difficultés pour la mise en œuvre en raison de la rapidité de leur prise. De plus, ils se fendillent souvent en séchant, accident qui ne doit pas être attribué au retrait, mais qui semble provoqué par l'humidité en excès qui tend à s'échapper à travers la surface déjà durcie. Cet accident est favorisé par la mauvaise habitude qu'ont les ouvriers de lisser les enduits, tandis qu'ils ne devraient s'attacher qu'à les comprimer fortement.

Ciments à prise lente ou ciments de Portland. — Les ciments de Portland sont beaucoup plus faciles à manipuler que les ciments romains ; on peut obtenir avec eux des enduits qui ont peu de tendance à se fissurer ; si on les emploie dans les maçonneries, leur adhérence aux pierres est plus grande que celle de toutes les autres gangues calcaires ; ils acquièrent enfin avec le temps une résistance supérieure à celle des meilleurs ciments romains.

De semblables propriétés rendent ce produit très précieux pour les constructeurs et justifient le développement donné à sa fabrication pendant ces dernières années.

Le ciment de Portland est d'un gris plus ou moins foncé, légèrement verdâtre; une teinte claire dénote ordinairement une cuisson un peu faible. Il se dissout dans l'acide chlorhydrique sans laisser de résidu appréciable; la dissolution se prend en masse gélatineuse lorsqu'elle est suffisamment concentrée.

DENSITÉ.

Une grande densité est un indice d'une bonne cuisson et les ciments de Portland trop légers, ne sont pas ordinairement susceptibles d'acquies une grande dureté après la prise. Pour ce motif, le dosage du ciment dans les mortiers doit être toujours fait au poids et non au volume.

Dans l'évaluation du poids du mètre cube d'un ciment, il faut avoir soin de tenir compte de la finesse de sa poudre et de son degré de tassement. L'expérience montre, en effet, que le poids d'un ciment, mesuré dans des conditions toujours identiques, est d'autant plus faible que sa poudre est plus finement moulue. Pour assurer, en outre, l'uniformité de tassement, il faut amener le ciment dans la mesure en le faisant glisser aussi lentement que possible sur un plan incliné, et pour que les résultats soient susceptibles de comparaison, il faut que l'angle de ce plan avec l'horizon, ainsi que la hauteur entre la partie inférieure du plan incliné et le bord supérieur de la mesure, soient maintenus constants.

Ordinairement on évalue le poids des poudres suffisamment moulues pour passer entièrement à travers un tamis de 100 mailles par centimètre carré; dans ces conditions, un bon ciment ne doit pas peser moins de 1300 kilog. par mètre cube.

L'influence de la densité sur la résistance des ciments se trouve démontrée par de nombreuses expériences faites par MM. Ed. Leblanc et Hervé-Mangon.

Des mortiers confectionnés avec des ciments ayant la même origine et amenés au même degré de finesse, dans la proportion de 1 volume contre 2 volumes de sable, ont donné, suivant les poids des ciments employés, les résultats suivants :

| TEMPS ÉCOULÉ DEPUIS LA PRISE. | RÉSISTANCE A L'ARRACHEMENT PAR CENTIMÈTRE CARRÉ. | |
|-------------------------------|--|--|
| | Ciment pesant 1200 kil. par mètre cube. | Ciment pesant 1500 kil. par mètre cube. |
| 5 jours. | 51 ^h | 78 ^h |
| 15 — | 76 | 130 |
| 30 — | 90 | 150 |
| 90 — | 150 | 196 |

D'après les chiffres de ce tableau, le ciment pesant 1500 kilog. par mètre cube aurait une résistance supérieure de 50 pour 100 à celle du ciment qui ne pèse que 1200 kilog.

On peut déduire les mêmes conclusions d'essais analogues faits en Allemagne et dont les résultats sont consignés dans le tableau suivant :

| TEMPS ÉCOULÉ DEPUIS LA PRISE. | RÉSISTANCE A L'ARRACHEMENT PAR CENTIMÈTRE CARRÉ. | |
|-------------------------------|--|--|
| | Ciment pesant 1190 kil. par mètre cube. | Ciment pesant 1400 kil. par mètre cube. |
| 7 jours. | 40 ¹ / ₂ , 84 | 59 ¹ / ₂ , 35 |
| 30 — | 42 , 41 | 65 , 43 |
| 90 — | 40 , 88 | 65 , 55 |

Un poids léger correspond, en général, à une cuisson imparfaite, ou à un eiment trop argileux; tandis qu'un poids élevé est l'indice d'une forte cuisson ou quelquefois d'un eiment riche en chaux.

Quoi qu'il en soit, il ne faudrait pas attacher une trop grande importance à l'appréciation d'un ciment par son poids au mètre cube. En faisant même abstraction des matières étrangères qui pourraient être introduites dans les poudres et rendraient l'épreuve illusoire, il serait, en principe, inexact de dire que les ciments les plus lourds sont les plus résistants. Les nombreux essais effectués en Angleterre, notamment par M. Grant, sur des eiments dont les poids variaient entre 1500 et 1500 kilos par mètre cube, prouvent qu'il n'y a pas proportionnalité entre le poids d'un eiment et sa résistance définitive¹.

Le elassement des eiments, d'après leur poids par mètre cube non tassé, ne peut avoir de réelle valeur que lorsqu'on expérimente sur des ciments de même provenance.

En dehors de ce cas, il n'y a donc pas lieu de rechercher, d'une manière absolue, les eiments les plus lourds; il faut seulement se mettre en garde contre l'emploi de eiments trop légers, dont le poids n'atteindrait pas la limite inférieure indiquée plus haut.

Ainsi que nous l'avons dit, la comparaison des ciments, d'après leur poids par mètre cube, n'est admissible que dans le cas où les poudres sont aussi identiques que possible au point de vue de la finesse et du degré de tassement. Cette double condition est assez difficile à remplir et on n'est même jamais assuré qu'elle soit rigoureusement satisfaite. Quelques expérimentateurs ont pensé pouvoir éliminer ces causes d'erreur en déterminant le poids spécifique des poudres, mais les limites entre lesquelles varie ce poids, pour des eiments de qualité très différente, sont si restreintes qu'il est nécessaire de le déterminer avec une très grande approximation.

Un appareil assez simple qui permet d'effectuer cette mesure avec une certaine précision est le gravimètre de l'ingénieur anglais Mann (fig. 26).



Fig. 26.

1. Min. Proc. Inst. civil Engineers.

Cet appareil se compose d'un flacon A dont la contenance est limitée par un repère *c* et d'un tube B muni à sa partie inférieure d'un robinet R; la contenance de ce tube jusqu'au repère *d* est exactement égale à celle du flacon A.

Ce tube est rempli jusqu'en *d* d'un liquide sans action sur le ciment, comme l'essence de térébenthine, l'alcool absolu, l'huile de paraffine, et on introduit dans le flacon un poids donné de ciment qui ne doit pas occuper plus de la moitié de sa capacité. On verse alors par-dessus, au moyen du robinet R, une partie du liquide contenu dans le tube B, en agitant légèrement le flacon de manière à faciliter le dégagement de toutes les bulles d'air retenues par le ciment. Le flacon est ensuite rempli très exactement jusqu'au repère C.

Le volume de liquide restant, après cette opération, dans le tube B correspond à celui des grains de ciment. Pour plus de commodité, on gradue le tube de manière qu'on y puisse lire directement le poids spécifique du ciment.

Les mesures faites avec le gravimètre ont donné, pour les différents ciments expérimentés, des poids spécifiques compris entre 2,9 et 3,1, tandis que la densité obtenue pour la pierre, à la sortie du four, est en moyenne de 2,55. Cette différence tient à la porosité de la pierre cuite, qui est d'ailleurs visible à l'œil nu.

FINESSE DES POUDRES.

Si l'on prend un ciment quelconque du commerce et qu'on le fasse passer sur un tamis ayant jusqu'à 900 mailles par centimètre carré, la partie qui a passé à travers le tamis peut fournir un mortier qui fait prise au bout de peu de temps; mais si, au lieu d'employer la poudre fine, on n'emploie que la partie grossière retenue par le tamis, le mortier ainsi composé ne commencera à prendre qu'au bout d'un temps assez long et n'acquerra jamais, même après plusieurs années, qu'une très faible résistance.

Cette partie grossière est cependant la portion du ciment qui, réduite en poudre fine, donnerait les meilleurs résultats; elle est, en effet, presque essentiellement constituée par les parties les mieux cuites et qui ont acquis leur plus grande dureté par la cuisson.

Quand on veut déterminer la valeur intrinsèque d'un ciment, il faut donc se garder d'éliminer les granules séparés par un premier tamisage. Ceux-ci doivent être soumis à un nouveau broyage, jusqu'à ce que le ciment expérimenté ait passé intégralement à travers le tamis donné. Cette manière de procéder n'a pas toujours été suivie par les expérimentateurs qui se sont occupés de cette question; elle peut avoir cependant une grande influence sur les résultats obtenus, ainsi que le met en évidence le tableau suivant, extrait des tables de M. Henry Faïja ¹.

1. *Proceedings royal Institute British Architects*, 1879-80.

| DÉSIGNATION des échantillons. | Poids en kilog. par mètre cube. | Poids spécifique | FINESSE. Taux pour 100 de résidus laissés sur un tamis ayant par cent. carré | | | CHARGE de rupture par centimètre carré | |
|----------------------------------|--|---------------------|--|-----------------|-----------------|--|---------------------|
| | | | 96 mailles. | 385 mailles. | 760 mailles. | après 7 jours. | après 28 jours. |
| N° 1... | a..... | 1448 | | 14 | 50 | 35 ^k ,80 | 45 ^k ,68 |
| | b..... | 1556 | | Rien. | | 51 ,76 | 44 ,20 |
| | c..... | 1592 | | Rien. | | 55 ,48 | 49 ,89 |
| | d..... | 1504 | | Tout. | | | |
| | e..... | 1429 | | Rien. | | | |
| N° 2... | a..... | 1441 | 2 | 16 | | 35 ^k ,76 | 45 ^k ,68 |
| | b..... | 1292 | | Rien. | | 40 ,26 | 46 ,94 |
| | c..... | 1355 | | Rien. | | 58 ,09 | 47 ,45 |
| | d..... | 1622 | | Tout. | | | |
| | e..... | 1429 | | Rien. | | | |
| N° 3... | a..... | 1417 | 2 1/2 | 25 | | 37 ^k ,60 | 46 ^k ,45 |
| | b..... | 1245 | | Rien. | | 58 ,44 | 48 ,98 |
| | c..... | 1299 | | Rien. | | 40 ,20 | |
| | d..... | 1591 | | Tout. | | | |
| | e..... | 1555 | | Rien. | | | |

a. Ciment tel qu'il est livré par le commerce.

b. Partie fine du ciment a obtenue après passage sur le tamis de 385 mailles.

c. Ciment a moulu jusqu'à passage complet à travers le même tamis.

d. Partie grossière retenue sur le tamis de 385 mailles et formant le complément de la partie fine b.

e. Partie grossière d moulu jusqu'à passage complet à travers le même tamis.

Les chiffres insérés dans ce tableau fournissent une preuve incontestable de l'avantage qui dérive d'une fine mouture au point de vue de la résistance finale du ciment ; ils montrent également l'intérêt qu'il peut y avoir à réduire en poudre les parties grossières séparées par un premier tamisage. Ils prouvent enfin que le poids spécifique, le poids par mètre cube et la finesse d'un échantillon de ciment sont des propriétés corrélatives qui ne doivent pas être considérées isolément. En conséquence, si l'on exige une plus grande finesse du ciment, on doit, en même temps, se contenter d'un poids plus faible par mètre cube.

L'importance d'une fine mouture est encore beaucoup plus grande lorsque le ciment, au lieu d'être employé pur, est mélangé au sable. Les parties grossières du ciment jouant plus ou moins le rôle de matières inertes, viennent s'ajouter au sable, de telle sorte qu'avec une proportion relativement faible de ce dernier, il est possible que les parties ténues ne soient pas en quantité suffisante pour assurer la cohésion parfaite de l'agrégat.

On doit à M. Michaëlis d'avoir nettement établi l'influence de la fine mouture sur la résistance d'un mortier de ciment.

Ses expériences ont consisté à faire passer un ciment donné sur différents tamis de manière à obtenir des poudres de plus en plus fines, puis à confectionner avec

ces poudres des mortiers d'égale résistance, en faisant varier la proportion de sable¹.

M. Michaëlis a expérimenté sur 4 poudres différentes, définies comme il suit :

N° 1. Ciment non tamisé.

N° 2. Poudre passée à travers un tamis de 900 mailles par cent. carré ;

N° 3. — — — 2500 —

N° 4. — — — 5000 —

Avec ces poudres il a confectionné 4 mortiers ayant la composition suivante :

N° 1. 1 partie en poids de ciment non tamisé, n° 1 et 5 parties de sable.

N° 2. 1 partie en poids de ciment tamisé n° 2 et 6,50 —

N° 3. 1 partie en poids de ciment n° 3 et 8,50 —

N° 4. 1 partie en poids de ciment n° 4 et 10,50 —

Ces mortiers, après durcissement dans l'eau, soumis à l'arrachement, ont donné les résistances suivantes par centimètre carré :

| DÉSIGNATION DU MORTIER. | TEMPS ÉCOULÉ DEPUIS LA PRISE. | | |
|-------------------------|-------------------------------|--------------------|---------------------|
| | 50 jours. | 90 jours. | 180 jours. |
| N° 1..... | 7 ^k ,44 | 9 ^k ,59 | 11 ^k ,29 |
| N° 2..... | 7,92 | 8,93 | 11,14 |
| N° 3..... | 7,92 | 8,54 | 12,54 |
| N° 4..... | 6,90 | 9,42 | 11,46 |

Il résulte de ce tableau que, malgré les proportions très différentes de sable mélangées aux diverses poudres de ciment, les mortiers obtenus ont présenté des résistances sensiblement équivalentes.

En particulier, la comparaison du mortier n° 4 avec le mortier n° 1 montre qu'une partie de ciment passé au tamis de 5000 mailles donne un mortier de même résistance que 2 parties de ciment non tamisé unies à la même quantité de sable.

RÉSISTANCE A LA TRACTION ET A LA COMPRESSION.

Les résultats obtenus par les expériences précédentes sur le poids et la finesse ne déterminent, en somme, que certaines propriétés que doit posséder tout bon ciment, mais ils ne donnent point de renseignements bien précis sur sa résistance future. Lorsque l'on doit employer un ciment dans l'exécution de travaux importants, il convient encore de procéder à des essais directs de résistance, en confectionnant, avec le ciment donné, des briquettes que l'on soumet ensuite, à différentes époques, à des efforts de traction ou de compression.

1. *Journal du Céramista et du Chauffournier.*

Comme il est généralement impossible de connaître la nature des efforts qui s'exercent sur les ciments dans les constructions, on se contente le plus souvent de les essayer à la traction, attendu que ce genre d'effort est d'une application plus facile et peut être mesuré avec une plus grande exactitude. Il est, du reste, à remarquer que, dans les conditions spéciales où se font les essais, on ne peut obtenir que des résultats comparatifs.

Dans un essai de ce genre, on doit se proposer de placer le ciment dans les meilleures conditions de résistance; or le succès peut dépendre à la fois de la forme adoptée pour les briquettes, de la quantité d'eau ajoutée pour le gâchage, et de l'habileté apportée au moulage des briquettes.

La forme de la briquette doit être telle que, étant placée entre les griffes de la machine d'essai, elle ne puisse être soumise qu'à un effort de traction, à l'exclusion de tout autre; si, dans ces conditions, la masse est bien homogène, la rupture ne peut se produire que suivant le plan de plus faible section. En outre, la forme de la briquette doit se prêter à un dégagement facile du moule. Nous donnons sur la figure 27 quelques profils de briquettes d'essai.

La forme représentée dans la figure *a*, qui fut adoptée à l'origine et qui n'est pas encore tout à fait abandonnée, offre des angles droits qui sont notoirement défavorables à la résistance, aussi la rupture se produit presque inévitablement suivant la ligne ponctuée, et non point suivant la section médiane.

La figure *b* représente une forme encore quelquefois usitée. On introduisait par les trous carrés, ménagés dans la masse, des lames d'acier qui, dans la machine d'essai, reposaient sur des tranchants de couteau; l'effort était ainsi appliqué aussi près que possible du centre. Mais la briquette entière a une forme assez incommode à obtenir et elle exige, en outre, une assez grande quantité de ciment, ce qui est souvent un obstacle à une bonne réussite.

La figure *c* donne la forme primitivement adoptée par M. Michaëlis dans ses essais; les 4 points de contact des griffes ne sont pas suffisamment déterminés, et il peut en résulter des efforts autres que celui de traction, aussi les briquettes se brisent souvent suivant les lignes ponctuées.

La figure *d* représente la forme indiquée par M. Grant; elle est la seule qui donne incontestablement les résultats les meilleurs et les plus réguliers. Les griffes de la machine sont à branches courbes et les extrémités viennent s'appliquer aux points A. Quand la briquette est placée convenablement dans les griffes, la rupture se produit

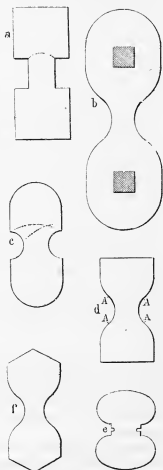


Fig. 27.

invariablement au point de moindre section et les charges de rupture obtenues sont supérieures à celles que donnent toutes les autres formes jusqu'ici adoptées.

La briquette représentée figure *e* est celle qui est en usage en Allemagne; il est inutile de dire que la rupture se produit ici toujours suivant la section la plus faible, à cause de l'entaille pratiquée en ce point, mais le fait d'une variation brusque de la section transversale doit réduire considérablement la résistance. Enfin la figure *f* représente une légère modification de la briquette de M. Grant recommandée par M. Faija. Les extrémités plates sont remplacées par deux parties biaisées qui donnent plus de facilité pour le dégagement du moule; en même temps les arêtes extrêmes déterminent une ligne d'axe qui sert de guide pour placer convenablement la briquette entre les griffes de la machine d'essai.

En France, les briquettes ont ordinairement, dans leur partie la plus étroite, une section carrée de 0^m,04 de côté. En Angleterre, on a, depuis peu, réduit cette section à 1 pouce carré, soit 6^{cm},45. Cette réduction permet de couler les briquettes par série de cinq et donne ainsi plus de régularité dans les résultats. En Allemagne, on a également réduit la section de rupture à une surface de 5 centimètres carrés.

Dans les essais de laboratoire, le ciment doit être gâché avec le moins d'eau possible et cependant avec une quantité suffisante pour donner une pâte bien liante. La quantité d'eau rigoureusement nécessaire varie, d'ailleurs, avec la nature du ciment et son degré de finesse. Il est rare qu'un ciment puisse être gâché avec moins de 16 pour 100 d'eau ou qu'il soit nécessaire de plus de 20 pour 100; la plupart des ciments prennent de 17 à 18 pour 100. Mais, si l'on mélange le ciment avec le sable, la proportion d'eau peut être considérablement moindre et réduite jusqu'à 9 ou 9,5 pour 100, quand le sable et le ciment sont dans la proportion de 5 à 1.

Il n'est pas possible de donner ici des instructions complètes sur la manière de gâcher le ciment; nous nous bornerons à dire que le ciment doit, par une manipulation convenable à la truelle, être amené à l'état de pâte suffisamment ferme pour se maintenir d'elle-même dans la forme donnée par le corroyage et en même temps assez plastique pour prendre aussi exactement que possible la forme du moule à briquettes.

Pendant le remplissage du moule, on doit s'attacher à expulser complètement toutes les bulles d'air emprisonnées dans la masse et qui nuiraient à la résistance finale; on y arrive en secouant légèrement le moule et en le frappant sur les côtés. Il ne reste plus ensuite qu'à lisser la surface de la briquette avec la truelle et à la laisser reposer jusqu'au moment où elle sera suffisamment prise pour supporter l'enlèvement du moule. L'opération complète du gâchage et du remplissage du moule doit être faite aussi rapidement que possible et ne pas durer, en tous cas, plus de sept à huit minutes, depuis le moment de l'addition de l'eau jusqu'au moment où la briquette est terminée et laissée au repos. Dès que la briquette a fait prise, on la retire du moule avec précaution et on l'immerge dans l'eau jusqu'au moment de l'essai.

Les appareils employés pour mesurer la charge de rupture des briquettes sont de différents systèmes; le point essentiel est de n'appliquer l'effort de traction que progressivement et par degrés uniformes. Ordinairement on suspend la briquette entre deux armatures en fer dont l'une est invariablement fixée, tandis que l'autre

est reliée au petit bras du fléau d'une romaine ; le grand bras de ce fléau reçoit, d'une part, une charge principale constituée par des poids suspendus à son extrémité, et, d'autre part, une charge additionnelle que l'on fait croître graduellement jusqu'à la rupture de la briquette au moyen d'un curseur glissant le long du fléau.

La figure 7, planche III, représente un appareil de ce genre : l'armature de la briquette E, sur laquelle on exerce la traction, est ici reliée au petit bras du fléau par l'intermédiaire d'un levier A, qui a son point fixe sur un bâti en fer B solidement établi ; ce levier permet de réduire la charge effective à appliquer au grand bras du fléau de la romaine. Le mouvement du curseur s'obtient à l'aide d'une fourchette C que l'on déplace au moyen d'une vis sans fin.

Le même appareil peut être utilisé pour mesurer la résistance à l'écrasement. A cet effet, on donne à l'échantillon à essayer la forme d'un cube et on l'interpose entre la chape D et le dessous de la tablette supérieure du bâti B, laquelle est consolidée par deux entretoises qui la relient à la base. On charge ensuite progressivement le fléau de la romaine, comme dans les essais à la traction, jusqu'au moment où se produit l'écrasement du prisme.

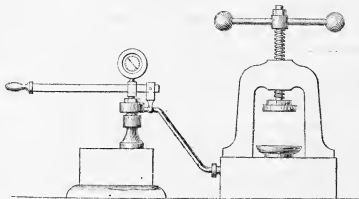


Fig. 28.

L'appareil de MM. Frühling et Michaelis, pour les essais de ciment à la traction, consiste, comme l'appareil précédent, dans un double système de levier auquel est reliée l'éprouvette ; mais la traction graduellement croissante est obtenue au moyen de grenaille que l'on répand lentement dans un vase suspendu à l'extrémité du levier de charge. Au moment de la rupture, le vase est enlevé et pesé, et son poids est multiplié par les rapports des bras de levier correspondants. Pour les essais de résistance à l'écrasement, on se sert aussi souvent de presses hydrauliques du genre de celle qui se trouve représentée dans la figure 28.

Le cube à essayer est placé sur la tête du piston de la presse et est maintenu par une vis qui lui imprime une pression initiale. On refoule alors l'eau comprimée dans le corps de pompe de la presse et on observe les progrès de la pression au moyen d'un manomètre. Ce dernier est, d'ailleurs, muni d'un index qui reste en

place après l'écrasement de la brique et accuse, par sa position, la charge sous laquelle s'est produit l'écrasement ¹.

Mais, nous le répétons, les essais de résistance à l'écrasement donnent, en général, des résultats auxquels on ne peut attacher qu'une médiocre confiance. Malgré toutes les précautions que l'on peut prendre pour répartir uniformément la charge, les arêtes du cube cèdent presque toujours en premier, de sorte que la partie centrale résiste, en définitive, à une pression, par unité de surface, supérieure à celle que l'on relate dans les tables d'essai.

En outre, l'expérience montre que la résistance d'un prisme de ciment à l'écrasement, quand il n'est pas maintenu sur les côtés, diminue quand la hauteur augmente et varie sensiblement en raison inverse du carré de l'hypoténuse d'un triangle rectangle ayant pour côtés cette hauteur et la moitié du côté de la base.

On trouvera, dans le tableau suivant, les résultats d'essais de résistance, faits à l'École des ponts et chaussées, sur des échantillons de ciments de diverses provenances envoyés à l'Exposition universelle de 1878.

| DÉSIGNATION DES CIMENTS. | RÉSISTANCE par centimètre carré après un mois d'immersion | | RAPPORT des résistances à l'écrasement et à l'arrachement. |
|---|---|------------------|---|
| | à l'arrachement. | à l'écrasement. | |
| <i>Ciments à prise lente.</i> | | | |
| Portland de Frangey (Yonne) .. | 50 ^k 59 | 520 ^k | 10 ^k 55 |
| — de Lafarge-du-Theil (Ardèche) | 19,60 | 155,5 | 7,95 |
| — de Boulogne-sur-Mer (Pas-de-Calais) | 17,28 | 225,8 | 15,06 |
| — de Desvres (Pas-de- Calais) | 22,52 | 228 | 10,25 |
| — du bassin de Paris. . . | 27,02 | 288,7 | 10,45 |
| — de Samer (Pas-de- Calais) | 19,80 | 158 | 6,97 |
| — de Tenay (Ain) | 18,12 | 149,7 | 8,25 |
| — de Cruas (Ardèche) . . | 15,15 | 158,2 | 10,44 |
| — d'Argenteuil (Seine- et-Oise) | 28,97 | 295,7 | 10,20 |
| <i>Ciments à prise rapide.</i> | | | |
| Ciment de Vassy (Yonne) | 7,95 | 72,02 | 9,06 |
| — rapide de Saint-Bauzille (Hérault) | 10,77 | 85,6 | 7,76 |
| — des Moulinsaux (Seine) .. | 9,45 | 60,05 | 6,56 |
| — de Fresnes (Seine) . . . | 6,67 | 49,05 | 7,55 |
| — d'Argenteuil (Seine) . . | 8,27 | 58,2 | 7,05 |
| — de Nimines (Savoie) . . . | 10,50 | 95,5 | 9,06 |

Il résulte de ce tableau que les ciments à prise lente offrent, au point de vue de la résistance, un avantage très marqué sur les ciments à prise rapide, et que la

1. *Nouvelles Annales de la Construction*, 1881.

résistance à l'écrasement est environ 9 à 10 fois plus grande que la résistance à la traction.

POUVOIR ADHÉRENT DU CIMENT AU SABLE.

Les essais, ci-dessus relatés, sur la résistance de briquettes de ciment pur, ne fournissent que des indications sur la cohésion propre à chaque ciment ; mais, dans la pratique, comme le ciment de Portland est presque toujours mélangé au sable, on comprend que son adhérence plus ou moins grande avec le sable peut avoir aussi une certaine influence sur la résistance d'une construction.

En général, on peut admettre que les ciments qui acquièrent une forte cohésion, possèdent, en même temps, un grand pouvoir adhérent ; cependant, l'expérience montre que cette règle n'est pas absolue, et les exceptions qui peuvent se présenter justifient, dans certains cas, les essais directs du mortier de ciment et de sable.

On procède, d'ailleurs, pour ces essais, comme pour ceux de ciment pur. On confectionne, avec le mortier de ciment et de sable, des briquettes dont on détermine la résistance à la traction. Mais il est essentiel, pour obtenir des résultats comparatifs, de faire usage d'un sable toujours identique.

Par un lavage du sable et par un criblage à travers un tamis dont les mailles ont des dimensions données, on peut assurer la propreté et l'uniformité de grosseur des grains, mais il n'est pas aussi facile de répondre de l'identité de nature et de forme de ces grains dont l'influence n'est cependant pas douteuse.

M. Grant, qui a fait de nombreux essais en Angleterre, cite l'exemple de deux sables parfaitement tamisés sur un même crible et présentant au microscope sensiblement la même apparence, qui, mélangés au ciment, ont fourni des mortiers dont les résistances différaient de 50 pour 100.

En Allemagne, où ce genre d'essais se trouve beaucoup en faveur, le gouvernement, à son laboratoire de Berlin, livre, pour un prix modéré, un sable type spécialement destiné à l'estimation de la valeur du ciment.

Dans les autres pays où cet usage n'existe pas, il est souvent assez difficile de se procurer un sable toujours identique et la comparaison entre les résultats obtenus devient, dès lors, à peu près impossible.

Nous ne pensons pas, d'ailleurs, que des essais avec un sable type aient un véritable intérêt pratique, car le sable qui doit être réellement employé pour une construction donnée n'ayant souvent aucune ressemblance avec le sable type, la résistance du mortier pourra être très différente de celle qui a été obtenue dans les essais. Il nous paraît préférable de faire d'abord un essai du ciment pur pour apprécier sa qualité et de déterminer ensuite la convenance du sable à employer, en composant avec ce sable même et le ciment donné un mortier que l'on soumettra aux épreuves de résistance.

Si les résultats de ce dernier essai ne sont que médiocres, alors que ceux du premier avaient été satisfaisants, le défaut de résistance du mortier devra être attribué au sable et non pas au ciment.

IMPERMÉABILITÉ.

Lorsque le mortier de ciment est employé pour la construction de réservoirs, de conduites d'eau, de cuves de gazomètre, l'imperméabilité devient une qualité essentielle en présence de laquelle la résistance n'est plus que secondaire.

En Allemagne, pour mesurer le degré de perméabilité d'un ciment donné, on confectionne ordinairement des cylindres de 0^m,10 de diamètre sur 0^m,15 de hauteur avec des mortiers dont le dosage varie de 2 à 7 de sable pour 1 de ciment; on les laisse durcir sous l'eau ou à l'air, puis on les sèche à 100°.

On place ensuite six de ces éprouvettes entre deux plateaux de bronze faisant joint avec l'extrémité des cylindres et présentant, dans l'axe de chacun d'eux, une tubulure par laquelle on fait arriver de l'eau sous une pression de 5 mètres. L'eau qui suinte de chacune des éprouvettes est recueillie et pesée après un assez long laps de temps. Le poids obtenu donne la mesure de la perméabilité.

Un autre système consiste à placer debout des bloes cylindriques reposant à la base dans une nappe d'eau de 1 centimètre d'épaisseur, après avoir enduit la surface latérale des cylindres d'une matière grasse pour empêcher l'eau de monter à la surface par capillarité. Les hauteurs humectées par l'eau qui s'est élevée dans les cylindres, au bout d'un certain temps, indiquent, dans ce cas, la plus ou moins grande étanchéité du ciment.

L'expérience montre que les ciments les plus lourds et les plus finement moulus sont aussi ceux dont l'imperméabilité est la plus grande¹.

RÉSISTANCE A L'USURE.

Le ciment est aujourd'hui très fréquemment employé pour l'exécution de dallages dont la durée doit dépendre, en grande partie, de la dureté que peut acquérir le ciment employé et de sa résistance à l'usure.

M. Muller a imaginé une machine qui permet d'établir, sous ce rapport, une comparaison entre diverses espèces de ciment.

Cette machine se compose d'un bloe de granit de dureté connue, ayant 0^m,25 de longueur sur 0^m,20 de largeur, et reposant librement sur la dalle à essayer. Ce bloc peut recevoir un mouvement de va-et-vient et est chargé de manière à exercer sur la dalle une pression de 10 kilogrammes par décimètre carré. Des trous pratiqués dans le bloe donnent passage à du sable de Fontainebleau qui est introduit constamment entre le bloe et la dalle à essayer.

Un compteur de tours indique le nombre des mouvements de va-et-vient et un appareil micrométrique sert à mesurer l'usure après 10 000 de ces mouvements.

M. Muller a dressé ainsi, pour divers matériaux employés dans les constructions, un tableau dont nous donnons ci-dessous un extrait :

| NATURE DE LA DALLE. | Usure de dalle évaluée en centièmes de millimètre |
|--|---|
| Quartzites (parés bleus et roses)..... | 11 |
| Granit des trottoirs de Paris..... | 31 |
| Carreaux en grès cérame..... | 51 |
| Dallage en ciment de Portland de Boulogne coulé..... | 75 |
| Grès marin pour trottoirs (Paris)..... | 98 |
| Asphalte pour trottoirs (mastic de Seyssel)..... | 156 |
| Terre cuite de Bourgogne (suivant cuisson et qualité)..... | 50 à 150 |
| Terre cuite de Paris (suivant cuisson et qualité)..... | 140 à 500 |
| Ciment de Bédarrieux..... | 158 |

UTILITÉ DE LA CONSERVATION DES CEMENTS EN MAGASIN.

Les ciments réduits en poudre fine, s'éventraient et perdraient de leur énergie si l'on ne prenait pas le soin de les garantir du contact de l'air et de l'humidité. Ils doivent, en conséquence, être enfermés dans des fûts parfaitement clos et conservés dans des magasins bien secs.

Il y a intérêt à ne pas employer les ciments immédiatement après la cuisson; aussi, les fabricants les conservent ordinairement en magasin pendant deux ou trois mois avant de les livrer à la consommation. Pendant ce séjour en magasin, les ciments absorbent 1,5 à 2 pour 100 d'eau que s'assimile la petite quantité de chaux existant à l'état caustique dans le ciment frais.

D'après Rivot, cet hydrate de chaux agirait sur le silicate multiple en poudre très fine et le transformerait en combinaisons séparées : silicate et aluminat de chaux, oxyde de fer libre ou peut être partiellement combiné avec la chaux. Si cette réaction n'est pas complètement terminée au moment de l'emploi des ciments, elle se produit après la prise et peut, dans ce cas, être une cause de décomposition des mortiers.

CHANGEMENTS DE VOLUME PENDANT LA PRISE DE CERTAINS CEMENTS.

Les bons ciments ne doivent produire, au moment du gâchage avec l'eau, qu'une très légère élévation de température; dans le cas contraire, le dégagement de chaleur doit être attribué à un excès de chaux qui, sans empêcher la prise, est de nature à altérer la solidité ultérieure des mortiers immergés.

Cet excès de chaux peut produire un gonflement avec désagrégation des mortiers, quand l'extinction de la chaux se fait tardivement. Si, au contraire, la chaux est bien disséminée dans la masse et s'éteint immédiatement avant la prise, elle éprouve un retrait en se desséchant et détermine des fissures dans le mortier.

On peut constater le gonflement dans un mortier, au moyen d'une expérience très simple. Il suffit de prendre un verre de lampe, de 0^m,03 à 0^m,04 de diamètre, coupé suivant une génératrice; on y coule le mortier de ciment à essayer et le gonflement se trouve accusé par le degré d'ouverture de la fente. Si le ciment était au contraire sujet à éprouver un retrait, on pourrait s'en assurer en étendant une couche de ce ciment sur une ardoise que l'on exposerait à des variations de température en la

plongeant successivement dans l'eau froide et dans de l'eau à 50°. Dans ces conditions, le fendillement apparaîtra au bout de peu de jours, si le ciment essayé est un de ceux qui se contractent après la prise¹.

DURÉE DE LA PRISE ET MARCHE DU DURCISSEMENT.

Les ciments de Portland les meilleurs, gâchés avec une quantité d'eau convenable, font prise ordinairement dans une période de temps qui varie de trois à six heures. Le froid retarde la prise, mais, d'après les expériences de M. Béthencourt, le ciment atteindrait un maximum de résistance plus élevé dans un milieu ambiant à basse température.

Le durcissement est également plus lent sous l'eau qu'à l'air et les ciments immergés acquièrent une plus grande dureté.

D'une manière générale, les circonstances qui retardent le durcissement semblent avoir pour effet d'augmenter la résistance finale.

D'après M. Faija², le plus grand accroissement de résistance doit se produire dans la période comprise entre les 7 et 28 jours qui suivent le moment de la prise. Il résulte des nombreuses expériences qu'il a faites, que l'accroissement pendant cette période, pour un bon ciment de Portland, ne doit pas être inférieur à 25 pour 100.

La résistance à l'écrasement semble croître indéfiniment avec le temps, tandis que la résistance à la traction atteint le maximum de sa valeur au bout d'une durée de six mois à un an et décroît lentement ensuite. Cette conclusion résulte de l'examen des chiffres consignés dans le tableau suivant. Les essais qui se rapportent au ciment de Boulogne ont été faits à l'usine même; ceux qui concernent le ciment de Desvres ont été faits au laboratoire de l'École des ponts et chaussées.

| TEMPS ÉCOULÉ DEPUIS LA PRISE. | CIMENT de Boulogne. — Résistance par c. q. à la traction. | CIMENT DE DESVRES. | | |
|-------------------------------|--|----------------------|------------------|--|
| | | RÉSISTANCE PAR C. Q. | | RAPPORT des résistances à l'écrasement et à la traction. |
| | | à la traction. | à l'écrasement. | |
| 3 jours..... | 12,5 | 12 ¹ | 109 ¹ | 9 |
| 15 jours..... | 25 | 18,5 | 185 | 10 |
| 1 mois..... | 26,2 | 19,9 | 219 | 11 |
| 2 mois..... | 27,5 | 22,5 | 508 | 13,5 |
| 3 mois..... | 28,8 | 23,1 | 500 | 13 |
| 6 mois..... | 33,8 | 24,5 | 597 | 16,5 |
| 1 an..... | 35 | 23,5 | 458 | 19 |
| 2 ans..... | 28,8 | | | |
| 3 ans..... | 22,5 | | | |

INFLUENCE DE L'EAU EMPLOYÉE POUR LE GÂCHAGE.

M. Henry Faija a voulu se rendre compte de l'influence que pouvait avoir

1. Lipowitz, *Traité pratique de la fabrication du ciment de Portland*.

2. *Royal Institute of British Architects* (février 1880).

l'emploi de l'eau de mer pour le gâchage du ciment¹. A cet effet, après avoir préparé un certain nombre de briquettes dont la moitié avait été gâchée à l'eau douce et l'autre moitié à l'eau de mer, dans des conditions aussi identiques que possible, il en a immergé une partie dans l'eau douce, une autre partie dans l'eau de mer, et a laissé enfin une troisième partie durcir à l'air. Ces briquettes ont été ensuite soumises à des essais à la traction, au bout d'une période de temps variable entre 7 jours et 1 an, à dater du jour de leur fabrication.

Le ciment employé était un ciment de bonne qualité pesant 1428 kilogrammes par mètre cube non tassé. La proportion d'eau de mer ou d'eau douce employée pour le gâchage était de 17,24 pour 100 dans chaque cas. Les briquettes comprimées dans des moules n'étaient immergées que 24 heures, après leur fabrication, dans des cuves, où l'eau était renouvelée tous les quinze jours.

Les essais ont porté sur 360 briquettes qui ont été préparées dans l'espace de deux jours, afin que les différences constatées ne puissent être attribuées à une dépréciation ou à une altération du ciment. Le temps nécessaire à la prise a été en moyenne de 25 minutes avec le gâchage à l'eau douce et de 120 minutes avec le gâchage à l'eau de mer. Les résultats des essais sont résumés dans le tableau suivant, où chaque chiffre représente une moyenne obtenue en opérant sur 10 briquettes.

| CONDITIONS DES EXPÉRIENCES. | RÉSISTANCE A LA TRACTION EN KILOG. PAR CENTIMÈTRE CARRÉ APRÈS | | | | | |
|---|---|-----------|---------|---------|---------|-------|
| | 7 jours. | 28 jours. | 3 mois. | 6 mois. | 9 mois. | 1 an. |
| <i>Briquettes gâchées à l'eau de mer.</i> | | | | | | |
| 1. Immergées dans l'eau de mer... | 53,04 | 48,51 | 57,65 | 59,59 | 59,55 | 58,74 |
| 2. — — l'eau douce... | 29,88 | 57,47 | 52,40 | 55,78 | 52,66 | 53,71 |
| 3. Exposées à l'air... | 29,59 | 45,77 | 61,45 | 65,55 | 75,25 | 78,75 |
| <i>Briquettes gâchées à l'eau douce.</i> | | | | | | |
| 4. Immergées dans l'eau de mer... | 44,57 | 53,08 | 62,01 | 66,72 | 69,82 | 74,81 |
| 5. — — l'eau douce... | 56 | 43,59 | 46,68 | 59,62 | 59,27 | 59,06 |
| 6. Exposées à l'air... | 56,98 | 45,91 | 47,88 | 58,92 | 73,42 | 74,55 |

Il résulte de ces expériences que l'emploi de l'eau de mer n'a pas, en général, une influence nuisible sur la résistance finale du ciment et ne fait que retarder le durcissement au début.

En examinant de plus près les résultats consignés dans le tableau ci-dessus, il semble que le gâchage à l'eau de mer soit avantageux pour les ciments exposés à l'air, tandis que le gâchage à l'eau douce serait préférable pour les ciments immergés et principalement pour ceux qui sont immergés dans l'eau de mer. Mais ces dernières conclusions auraient besoin d'être confirmées par de nouvelles expériences faites sur des ciments de diverses provenances.

1. Mémoire communiqué à la Société des Ingénieurs civils de Londres, 1881-1882.

COMPOSITION CHIMIQUE.

Chaque fabrique de ciment s'attache ordinairement à livrer des produits de qualité régulière et par conséquent de composition chimique sensiblement constante.

M. Durand-Claye a analysé un grand nombre d'échantillons, de diverses provenances, qui avaient été présentés à l'Exposition universelle de 1878.

Le tableau suivant est un extrait des résultats qu'il a obtenus :

| PROVENANCE DES CIMENTS. | Silice combinée. | Alumine. | Chaux. | Sable siliceux. | Peroxyde de fer. | Magnésie. | Acide sulfurique. | Perte au feu et divers. | Indice d'hydraulicité |
|--|------------------|----------|--------|-----------------|------------------|-----------|-------------------|-------------------------|-----------------------|
| <i>Ciments à prise lente.</i> | | | | | | | | | |
| De Frangey près Lezinnes. . . (Yonne). | 21,61 | 7,35 | 63,70 | » | 3,17 | 1,22 | 0,61 | 2,16 | 0,46 |
| De Lafarge-du-Theil. (Ardèche). | 25,70 | 3,23 | 59,10 | 4,95 | 1,40 | 0,95 | 0,50 | 7,55 | 0,49 |
| De Cruas. (Ardèche). | 26,75 | 3,70 | 59,10 | 0,85 | 1,80 | 0,90 | 0,50 | 6,60 | 0,51 |
| De Boulogne-sur-Mer. (Pas-de-Calais). | 24,10 | 7,20 | 59,40 | 1,65 | 3,55 | 0,95 | 0,55 | 2,80 | 0,52 |
| De Desvres. (Pas-de-Calais). | 24,03 | 8,52 | 61,51 | » | 3,51 | 0,81 | 0,66 | 1,56 | 0,53 |
| Du bassin de Paris. (Seine). | 22,30 | 9,35 | 59,80 | » | 3,90 | 1,15 | 0,50 | 3 | 0,55 |
| De Samer. (Pas-de-Calais). | 24,70 | 8,25 | 60,50 | 1,45 | 2,95 | 0,85 | 0,20 | 1,10 | 0,55 |
| De Portland d'Argenteuil. . . (Seine). | 24,50 | 9,50 | 57,90 | » | 4,25 | 1,50 | 0,80 | 1,55 | 0,57 |
| De Tenay. (Ain). | 24,30 | 6,90 | 53,25 | 2,10 | 3,85 | 1,70 | 0,70 | 7,20 | 0,58 |
| De la Valentine. (Bouches-du-Rhône). | 21,25 | 8,60 | 50,45 | 0,85 | 4,20 | 2,05 | 1,65 | 10,95 | 0,59 |
| Du Rocher de Comboire. près Vif (Isère). | 23,15 | 9,55 | 53 | » | 4,55 | 4,45 | 1,80 | 3,70 | 0,62 |
| <i>Ciments à prise rapide.</i> | | | | | | | | | |
| De Saint-Bauzille. (Hérault). | 25,85 | 10 | 54,20 | » | 4,85 | 1,65 | 1 | 2,45 | 0,66 |
| Des Moulinaux. (Seine). | 27,55 | 7,75 | 50,25 | 4,35 | 3,85 | 1,05 | 0,55 | 4,85 | 0,70 |
| De l'Albarine. (Ain). | 25,45 | 9,25 | 47,95 | 2,40 | 3,85 | 1,45 | 0,70 | 8,95 | 0,72 |
| De la Bédoule. (Bouches-du-Rhône). | 25,45 | 11,60 | 49,05 | 3,20 | 4,75 | 1,05 | 1,25 | 5,65 | 0,75 |
| De Cabers. (Lot). | 28,20 | 10,75 | 50,65 | » | 3,50 | 1,05 | 2,10 | 3,75 | 0,77 |
| De Fresnes. (Seine). | 29,05 | 7,95 | 46,05 | 0,85 | 3,75 | 2,80 | 1,10 | 8,45 | 0,80 |
| D'Argenteuil. (Seine). | 29,55 | 8,35 | 47,50 | » | 4,10 | 3,85 | 1,55 | 5,50 | 0,80 |
| De la Valentine. (Dit de la Méditerranée). | 29,10 | 12,50 | 48,60 | » | 4,65 | 1,70 | 1,90 | 1,55 | 0,86 |

RÉSUMÉ.

Après avoir indiqué en détail les essais auxquels il faut soumettre un ciment pour reconnaître sa qualité, on peut résumer, comme il suit, d'après M. Faija, les propriétés que doit posséder un bon ciment de Portland.

1° Le ciment doit être assez finement moulu pour passer entièrement à travers un tamis de 100 mailles par centimètre carré et ne laisser qu'un résidu inférieur à 15 pour 100 sur un tamis de 400 mailles par centimètre carré.

2° Le poids par mètre cube de ciment non tassé doit être compris entre 1400 et 1500 kilogrammes.

3° Le poids spécifique doit se trouver compris entre 3 et 3,05.

4° Une pâte, faite avec la quantité d'eau minimum, ne doit pas prendre, en moins de 3 heures, ni en plus de 6 heures.

5° Les briquettes, placées dans l'eau 16 ou 17 heures après le gâchage, doivent, au bout de 7 jours d'immersion, pouvoir supporter un effort de traction de 25 à 50 kilogrammes par centimètre carré et, au bout de 25 jours d'immersion, cette résistance doit présenter une augmentation de 25 pour 100 au moins.

6° Un gâteau formé d'une pâte de ciment étalée sur une plaque de verre, après une exposition à l'air sec, ou dans l'eau, ne doit présenter ni fentes ni aucune altération de forme.

7° Le ciment doit avoir une couleur grise assez accentuée, et, lorsqu'il est gâché, il ne doit pas changer de couleur selon qu'il sera exposé à l'air ou immergé dans l'eau.

Pour certains travaux il peut être utile de spécifier une plus grande finesse, non seulement au point de vue d'une plus grande résistance finale, mais encore au point de vue de l'économie dans l'emploi. Dans ce cas, il y aura lieu d'abaisser la limite inférieure prescrite pour le poids par mètre cube. Un ciment, par exemple, qui pèse au moins 1400 kilogrammes par mètre cube, en laissant sur un tamis de 400 mailles un résidu de 12 à 15 pour 100, ne pèsera probablement pas plus de 1550 kil., s'il est assez finement moulu pour ne laisser que 5 à 6 pour 100 de résidu sur le même tamis.

Si, au lieu d'un ciment à prise lente, on recherche un ciment à prise rapide, le poids par mètre cube doit être très notablement abaissé, mais le poids spécifique ne doit pas être inférieur à 2,92.

Avec un ciment vif, le minimum de résistance à la traction, au bout de 7 jours, peut être augmenté et fixé à 55 kilogrammes par centimètre carré; mais, par contre, l'accroissement de résistance pendant la période comprise entre 7 et 28 jours doit être réduite à 10 ou 15 pour 100.

En Allemagne, où le ciment est essayé en mélange avec le sable, l'Union des fabricants de ciments, après de nombreux essais, a publié une série de renseignements généraux qui servent aujourd'hui de règles pour toutes les livraisons de ciment de Portland, et que nous croyons devoir citer, en raison de l'intérêt qu'ils nous paraissent présenter.

I. Les poids des barils et des saes dans lesquels est livré le ciment doit être uniforme.

Ces poids sont, pour les barils, de 180 kilogrammes brut et de 170 kilogrammes net.

Un déchet de 2 pour 100 est alloué pour le transport.

Les barils et les saes doivent porter la marque de fabrique et l'indication du poids brut.

II. Le ciment peut être commandé à prise lente ou à prise rapide suivant l'usage auquel on le destine. Dans la plupart des cas, on peut employer le ciment à prise lente et l'on doit lui donner la préférence, tant à cause de sa manipulation plus facile qu'en raison de sa plus grande résistance finale.

La désignation de ciment à prise lente s'applique à tout ciment qui fait prise au bout de plus d'une demi-heure.

III. Le ciment étant gâché, ne doit pas changer de volume. Pour vérifier si un ciment remplit cette condition, on formera, sur une plaque de verre ou sur une tuile, un gâteau de ciment que l'on immergera dans l'eau. Ce gâteau, abandonné ainsi pendant un temps assez long, ne devra présenter ni fissures, ni traces d'émiettement sur les bords.

IV. Le ciment de Portland doit être moulu assez finement pour ne pas laisser plus de 20 pour 100 de résidu grossier sur un tamis de 900 mailles par centimètre carré.

V. La résistance du ciment de Portland doit être déterminée par un essai à la traction d'un mélange de ciment et de sable. Cette épreuve doit être faite d'une façon toujours uniforme sur des briquettes d'une forme donnée et au moyen de machines d'essai semblables.

La section de rupture des éprouvettes d'essai doit être égale à 5 centimètres carrés.

VI. Un bon ciment de Portland, mélangé à un sable pur et rugueux, dans la proportion de 3 parties en poids de sable type contre une partie de ciment, gâché et essayé au bout de 28 jours, dont un jour à l'air et 28 jours sous l'eau, doit supporter un effort minimum de 10 kilogrammes par centimètre carré. Dans des cas spéciaux, on peut réclamer une résistance plus grande.

Le sable type, employé pour ces essais, s'obtient en lavant un sable quartzeux aussi pur que possible, que l'on fait sécher; on le tamise ensuite, d'abord sur un crible de 60 mailles par centimètre carré, pour éliminer les parties les plus grossières; puis, en dernier lieu, sur un crible de 120 mailles, pour en extraire les parties les plus fines.

Les briquettes doivent être essayées aussitôt après leur sortie de l'eau. Le ciment, qui accuse une résistance supérieure à 10 kilogrammes par centimètre carré, est en état de supporter une plus forte proportion de sable et peut, pour ce motif, comme, d'ailleurs, en raison de sa plus grande résistance à égale proportion de sable, justifier une augmentation de prix.

Pour les ciments à prise rapide, on doit se contenter d'une résistance à la traction inférieure à 10 kilogrammes par centimètre carré.

Telles sont les règles aujourd'hui adoptées dans toute l'Allemagne pour les livraisons de ciments de Portland.

En Autriche et plus récemment en Russie, des règlements à peu près semblables ont été établis et sont actuellement en vigueur.

En France, au contraire, les ciments destinés aux grands travaux sont essayés dans les conditions les plus variées.

Les Ponts et Chaussées prescrivent, dans certains de leurs cahiers des charges, des essais à la traction sur des briquettes ayant une section de rupture de 16 centimètres carrés et composées d'un mélange de 2 volumes de sable pour un 1 de ciment. Les épreuves sont faites après cinq jours seulement d'immersion et doivent donner une résistance minimum de 3 kil. 75 par centimètre carré.

Dans des cahiers des charges de la marine, on trouve les conditions suivantes :

« Le ciment étant gâché avec du sable de mer dans la proportion de 1 kilogramme de ciment pour 2 litres de sable, mis en briquettes et immergé, une section de la forme d'un carré de 0^m,04 de côté devra, au bout de 120 heures d'immersion, supporter une traction supérieure à 51 kilogrammes et, en moyenne, de 64 kilogrammes pour l'ensemble de toutes les briquettes essayées. »

Nous n'insisterons pas sur l'insuffisance de pareils essais, après l'exposé que nous venons de faire ; mais, en raison de l'importance qu'offre la connaissance de la valeur réelle d'un ciment, nous ne pouvons que souhaiter de voir, à l'exemple d'autres pays, élaborer par une réunion d'hommes compétents un ensemble de règles bien précises qui puissent être universellement adoptées pour les essais des ciments et servir de guide aussi bien à ceux qui le fabriquent qu'à ceux qui l'emploient.

DES POUZZOLANES

Les pouzzolanes sont des matières qui, par leur mélange à froid avec de la chaux grasse éteinte, peuvent former des mortiers qui durcissent plus ou moins rapidement sous l'eau.

Les pouzzolanes naturelles sont ordinairement d'origine volcanique. Elles tirent leur nom de Pouzzoles, ville d'Italie, aux environs de laquelle elles furent tout d'abord exploitées par les Romains, et sont essentiellement composées d'argile et de sable mélangés avec une certaine proportion de chaux, de magnésie, d'oxyde de fer et de principes alcalins.

Les pouzzolanes sont friables et relativement légères, leur densité ne dépasse guère 1,2 à 1,5.

Elles présentent des colorations très variables; elles sont grises, jaunes, brunes, violettes ou noires. Celle des environs de Rome est rouge brun.

On rencontre également en France de la pouzzolane près des anciens volcans de l'Auvergne et du Vivarais. Généralement, elle se trouve en couches plus ou moins puissantes, soit au pied des coulées de lave, soit entre les couches de deux coulées successives. Certaines laves poreuses peuvent elles-mêmes servir comme pouzzolanes après avoir été réduites en poudre.

Le *trass*, ou *terrasse* de Hollande, peut être considéré comme une variété de pouzzolane.

C'est une matière également d'origine volcanique dont la coloration varie du bleu au brun ou au jaune. Le trass gris bleuâtre est celui qui possède les meilleures qualités hydrauliques.

Le trass se rencontre sous forme de rognons et s'exploite depuis très longtemps dans de nombreuses carrières situées sur les bords du Rhin, notamment dans les environs d'Andernack.

Les matières pouzzolaniques sont partiellement attaquables par les acides; en particulier, le trass de Hollande porphyrisé, traité par l'acide chlorhydrique, l'évaporation à sec, abandonne ensuite à une dissolution faible de potasse environ la moitié de la silice qu'il contient (Rivot).

En raison de leur origine, ces substances présentent peu d'homogénéité et les compositions chimiques d'échantillons, provenant d'une même localité, sont souvent assez différentes.

Le tableau suivant donne les résultats d'analyses faites par MM. Vicat et Hervé-Mangon sur des échantillons de pouzzolanes naturelles et de trass de diverses provenances.

| PROVENANCE DES ÉCHANTILLONS. | Sable mélangé. | Silice. | Alumine. | Peroxyde de fer. | Chaux. | Magnésie. | Eau. | Produits volatils ou non dosés. | Alcalis. |
|--------------------------------------|----------------|---------|----------|------------------|--------|-----------|-------|---------------------------------|----------|
| Vésuve (variété brune)..... | 2,50 | 44 | 10,50 | 29,50 | 10 | traces | 2,50 | | 1 |
| — (variété gris foncé)..... | 1,50 | 44,50 | 16,50 | 15,50 | 10 | 5 | 5 | | 6 |
| — (variété gris clair).... | 2,50 | 42 | 15,50 | 12,50 | 9,50 | 4,40 | 5,55 | | 10,27 |
| Rome (caves de Saint-Paul).... | 5 | 47,66 | 14,33 | 10,55 | 7,66 | 5,86 | 7,05 | | 4,15 |
| Auvergne (variété noire)..... | » | 47,90 | 54,20 | | 8,20 | 5,90 | 5,20 | | 2,60 |
| — (variété rouge brun).... | » | 47,10 | 59, | | 7 | traces | 2,20 | | 4,70 |
| — (variété rouge brique) . | » | 46,05 | 17 | 20,55 | 8,55 | traces | 1,60 | | 6,55 |
| — (variété Gravenvère)... | » | 48 | 56,40 | | 8,10 | traces | 2,40 | | 4,80 |
| Hérault (variété jaune) | » | 48,40 | 55 | | 5,20 | 0,10 | 11,50 | | 1,80 |
| — (variété brune) | 7,48 | 50,75 | 11,65 | 24,92 | 5,75 | 2,49 | 19,02 | | » |
| Vivarais (variété rouge) | 5,65 | 53,60 | 20,89 | 18,16 | 4,58 | 5,65 | » | 15,51 | » |
| — (variété grise)..... | 5,11 | 58,54 | 15,76 | 20,44 | 1,70 | 1,14 | » | 17,51 | » |
| Trass d'Andernach (Prussc) | » | 48,94 | 18,95 | 12,54 | 5,41 | 2,42 | | 11,94 | |
| — de Hollande..... | » | 46,60 | 20,60 | 12 | 5 | » | 12,80 | | 5 |
| — des bords du Rhin..... | 8,75 | 46,25 | 20,71 | 5,48 | 2,15 | 1 | 9,25 | | 6,50 |

On rencontre dans le département des Ardennes et dans une partie de la région avoisinante, à l'étage inférieur du terrain crétacé, une roche tendre, d'un gris pâle, nommée *gaize*, qui jouit de propriétés hydrauliques remarquables.

Cette roche n'est point d'origine volcanique, et l'argile qu'elle renferme ne présente pas de traces de cuisson, mais elle contient une certaine quantité de silice gélatineuse, susceptible de se combiner à froid avec la chaux.

Les analyses de H. Sainte-Claire Deville ont donné les proportions moyennes suivantes :

| | |
|--|-----------|
| Eau hygrométrique (perdue à 100°). | 5,50 |
| Eau de combinaison (perdue au rouge) | 6,55 |
| Silice soluble (dans une dissolution de potasse au 1/10) | 58,75 |
| Silice insoluble. | 58,86 |
| Alumine. | 5,56 |
| Peroxyde de fer. | 5,27 |
| Chaux. | 2,60 |
| Magnésie | 0,46 |
| Alcalis (non dosés) et perte | 0,67 |
| | <hr/> 100 |

En mélangeant 5 parties de gaize avec 1 partie de chaux, Vicat a obtenu un mortier hydraulique faisant prise en 7 jours et acquérant la même consistance que ceux fabriqués avec les meilleures pouzzolanes, mais il a déclaré plus tard que les mortiers de gaize s'altéraient et se ramollissaient au bout de peu de temps.

Au laboratoire de l'École des Ponts et chaussées, on a obtenu, avec 1 partie de chaux et 2 parties de différentes gaizes, des mortiers faisant prise du 10^e au 15^e jour et qui, au bout d'un an, présentaient une consistance parfaite¹.

1. Durand-Claye, *Cours de construction*.

POZZOLANES ARTIFICIELLES.

Indépendamment des produits naturels qui peuvent entrer, sans aucune préparation, dans la composition des mortiers hydrauliques, on rencontre un assez grand nombre de substances dont les propriétés hydrauliques, à l'état naturel, sont nulles ou très peu prononcées, mais qui, par la cuisson ou quelquefois par une simple torréfaction, donnent lieu à des produits tout à fait analogues aux pouzzolanes. Ces substances sont désignées sous le nom de *pouzzolanes artificielles*.

Argile cuite. — Parmi ces substances, celles qui sont les plus répandues à la surface du globe sont des argiles, composées essentiellement de silice et d'alumine plus ou moins mélangées de carbonate de chaux et d'oxyde de fer.

Lorsqu'on les chauffe au delà du rouge sombre, c'est-à-dire à une température comprise entre 600 et 700°, les argiles durcissent et ne font plus pâte avec l'eau; elles deviennent poreuses et acquièrent des propriétés hydrauliques dont l'intensité dépend beaucoup du degré de cuisson. L'hydraulicité de ces argiles augmente d'abord avec la durée de la cuisson pour décroître ensuite. D'après Vicat, le degré de cuisson, qui transforme les argiles en pouzzolanes au maximum de puissance hydraulique, correspond à la vaporisation complète de l'eau combinée. Avec les argiles marneuses, il est indispensable que la cuisson soit suffisante pour décomposer entièrement le carbonate de chaux et combiner la chaux avec l'argile; il faut cependant éviter de dépasser 700 à 800° et suppléer à l'intensité du feu par la durée de la cuisson.

Le contact de l'air, pendant la cuisson, est nécessaire pour développer les propriétés pouzzolaniques. Cette action n'est pas parfaitement expliquée, mais il est un fait, c'est que les argiles cuites en vase clos sont difficilement attaquables par les acides.

Pour cuire l'argile, on la divise en morceaux de la grosseur d'un œuf que l'on soumet à une dessiccation préalable dans des séchoirs. Ces morceaux sont ensuite portés dans des fours spéciaux à la chaleur convenable pour leur transformation en pouzzolanes. Quelquefois, on se contente de les placer à la partie supérieure des fours à chaux, où la chaleur perdue par le four, jointe à la violence du courant d'air qui règne dans cette partie, est favorable à la cuisson de l'argile. On peut aussi mouler la terre sous forme de briques ordinaires, à la condition de la rendre poreuse en y mêlant une certaine quantité de paille hachée ou de sciure de bois.

Une autre méthode de cuisson consiste à réduire d'abord l'argile en poudre et à la faire rougir ensuite sur des plaques de fer exposées à l'action du feu.

Mais cette méthode, indiquée par Vicat, comme devant permettre d'obtenir des produits plus parfaits, donne lieu à des projections de poussières au contact des parois incandescentes et détermine une perte considérable de matière; pour ce motif, elle a dû être abandonnée.

L'analyse de différentes pouzzolanes d'argile cuite a donné les résultats suivants :

| MATIÈRES DOSÉES | Argile fine ocreuse. | Argile de Paviers. | Argile blanche. | Argile de la Rance. |
|---------------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------|------------------------|
| Alumine..... | 22,55 | 52,56 | 55,50 | 15,50 |
| Silice..... | 65,50 | 49,04 | 66,50 | 50,50 |
| Chaux..... | » | » | » | 17,52 |
| Peroxyde de fer..... | 10,40 | » | » | 4 |
| Magnésie..... | » | 2,50 | » | » |
| Principes solubles et volatils. | 1,75 | 2 | » | 4,48 |
| Matières inertes..... | » | 14,10 | » | 50 |
| | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

Schiste calciné. — L'emploi du schiste bleu calciné, comme pouzzolane, a été indiqué par un ingénieur suédois, M. Baggé. On opère la calcination dans des fours à chaux ordinaires; sous l'action d'une chaleur convenable, les feuillets se boursouflent et se prennent en masses poreuses, friables et d'un vert pâle.

En France, M. Gratien Lepère, ingénieur des Ponts et chaussées, a obtenu une très bonne pouzzolane par la calcination du schiste ferrugineux de Ilainneville, près de Cherbourg. La composition de cette pouzzolane est la suivante :

| | |
|-----------------------|-----------|
| Alumine. | 26 |
| Silice. | 46 |
| Magnésie. | 8 |
| Chaux. | 4 |
| Oxyde de fer. | 14 |
| Perte et eau. | 2 |
| | <hr/> 100 |

Basalte calciné. — Le basalte, qui est une roche formée par les éjections volcaniques sous-marines, a été utilisé pour fabriquer de la pouzzolane dès 1787, par M. de Cessart.

Pour réduire le basalte en pouzzolane, on le porte dans un four, à une température assez élevée pour qu'il commence à couler.

L'analyse chimique du produit calciné a donné :

| | |
|-----------------------------|--------------|
| Alumine. | 16,75 |
| Silice. | 44,50 |
| Oxyde de fer. | 20,00 |
| Chaux. | 9,50 |
| Oxyde de manganèse. | 2,57 |
| Soude. | 2,60 |
| Perte et eau. | 4,28 |
| | <hr/> 100,00 |

Sables et arènes torréfiés. — Dans certaines localités, on rencontre des sables ou arènes jouissant, à l'état naturel, de propriétés pouzzolaniques qu'une légère torréfaction augmente très notablement. Ces matières résultent de la décomposition de roches anciennes et doivent leurs propriétés à l'argile qu'elles contiennent en plus ou moins grande quantité.

Les plus connus sont les sables de Bretagne, ou psammites, qu'on extrait de carrières situées dans les environs de Brest, de Châteaulin, de Saint-Servan et les arènes de Saint-Astier entre Périgucux et Mussidan (Dordogne). L'analyse, d'après Vicat, leur a assigné la composition suivante :

| PROVENANCE DES ÉCHANTILLONS. | Sable mélangé. | Silice. | Alumine. | Peroxyde de fer. | Chaux. | Magnésie. | Eau. | Produits volatils et non dosés. |
|---------------------------------------|----------------|---------|----------|------------------|---------|-----------|------|---------------------------------|
| Arène de St-Astier (avant torréfact.) | 4,15 | 58,54 | 20 | 12 | 4,48 | | 17 | 3,85 |
| Psammites (après torréfaction) : | | | | | | | | |
| — de Brest... .. | » | 60,55 | 21,45 | 8,57 | 6,69 | | 2,75 | |
| — de Châteaulin..... | » | 60,50 | 25,70 | 10,50 | traces. | 2,50 | 5,20 | |
| — de Saint-Servan | 10,50 | 58,50 | 20,40 | 18,10 | 2 | » | 1,50 | |

Grès argileux. — Aux environs de La Fère, M. Ménard a découvert certains grès friables, à gangue argileuse, qui présentent des propriétés pouzzolaniques d'autant plus énergiques que les roches sont plus compactes. Ces propriétés se développent par une torréfaction en plein air sur une plaque de tôle chauffée à une température modérée.

RÉSIDUS D'EXPLOITATIONS INDUSTRIELLES EMPLOYÉS COMME MATIÈRES POUZZOLANIQUES.

Lorsque l'emploi de pouzzolanes de qualité supérieure n'est pas absolument nécessaire, on peut utiliser, comme matières pouzzolaniques, certains résidus ou rejets de fabrications industrielles qu'il est souvent facile de se procurer à bon compte.

Telles sont, par exemple, les pouzzolanes obtenues avec les cendres de houille, de tourbe et de bois, les scories et laitiers, les débris de briques, de tuileaux ou de poteries, etc.

Cendres de houille, de tourbe, de bois. — Les cendres de houille, pour être employées comme pouzzolanes, doivent être bien pures et débarrassées par un tamisage de tous les débris de charbon. Comme elles sont très hygrométriques, elles doivent être conservées dans des magasins couverts et à l'abri de l'humidité.

D'après Vicat, les cendres de houille, obtenues avec un feu lent, sont supérieures à celles qui se trouvent à l'état de scories.

La cendrée, que l'on retire des fours à chaux chauffés à la houille et qui est un

mélange de cendres de houille et de chaux en poussier, donne un excellent mortier.

Les cendres de tourbe et de bois peuvent être également employées avantageusement dans la confection des mortiers exposés à des alternatives de sécheresse et d'humidité.

Scories et laitiers. — Les scories de forge, que l'on désigne vulgairement sous le nom de mâchefer, et certains laitiers de hauts-fourneaux possèdent également la propriété de donner, avec la chaux ordinaire, des mortiers durcissant sous l'eau. Les laitiers, susceptibles d'être employés comme pouzzolanes, doivent être attaquables par l'acide chlorhydrique et donner lieu à un dépôt gélatineux.

L'analyse de deux échantillons de laitiers, utilisés comme matières pouzzolaniques et provenant de Gleiwitz (Silésie), a donné, comme moyenne, les résultats suivants :

| | |
|-----------------------------------|--------------|
| Alumine. | 15,40 |
| Silice. | 40,40 |
| Chaux. | 54,70 |
| Oxyde de fer et de manganèse. . . | 6,60 |
| Potasse et soude. | 2,90 |
| | <hr/> 100,00 |

Débris de briques ou tuileaux. — Les matières que l'on obtient par la pulvérisation des débris de briques, de tuileaux ou de poteries jouissent naturellement de propriétés pouzzolaniques très variables, puisque ces propriétés dépendent non seulement de la composition chimique des matières, mais encore de leur degré de cuisson. En général, elles ont été portées à une température trop élevée; toutefois, en faisant un triage convenable des rebuts de la fabrication des briques, on peut, dans certains cas, obtenir une très bonne pouzzolane.

Ciment à l'eau-forte. — On désignait, autrefois, sous le nom de ciment à l'eau-forte, une pouzzolane très énergique, formée au moyen des résidus provenant de la fabrication de l'acide nitrique, pour laquelle on employait, à Montpellier, l'argile et le nitrate de potasse. Le résidu argileux, retiré des cornues, après chaque opération, était friable, boursoufflé, presque vitreux, et constituait une combinaison d'argile ferrugineuse, de potasse et de quelques sels alcalins, mais la source de ce produit a disparu depuis un certain nombre d'années.

Ciment éventé. — Le ciment éventé ne fait plus pris seul, mais il agit comme une pouzzolane, lorsqu'on le mélange à la chaux grasse, et donne un bon mortier hydraulique.

Généralités sur les pouzzolanes. — Quelle que soit la provenance des pouzzolanes, il y a une très grande importance à les réduire, comme les ciments, en poudre impalpable avant de les employer dans la confection des mortiers.

La qualité d'une pouzzolane ne peut guère s'apprécier, avec certitude, que

par des expériences directes. Toutefois, l'inspection du grain peut déjà fournir quelques indications. Un grain d'aspect vitreux, dur et ne happant pas à la langue est généralement un indice d'une qualité médiocre.

Un autre mode d'essai, indiqué par Vicat, repose sur l'action des pouzzolanes sur l'eau de chaux. Cette eau, mise en contact avec une quantité suffisante de pouzzolane en poudre, est en partie décomposée; la chaux est absorbée par la pouzzolane et se précipite avec elle; cette action est d'autant plus énergique que la propriété pouzzolanique est plus développée. On peut donc avoir une idée de la puissance pouzzolanique d'une matière en déterminant le volume d'eau de chaux susceptible d'être décomposé par un poids donné de cette matière.

M. Landrin a récemment proposé¹ de modifier ce mode d'essai de manière à le rendre beaucoup plus expéditif et en même temps plus sûr. Après avoir établi que l'hydraulicité d'une pouzzolane est due essentiellement à un état spécial de la silice insoluble dans les acides, il commence par traiter les échantillons à essayer par un acide; puis, il recherche, dans la partie insoluble, la silice hydraulique, c'est-à-dire celle qui jouit de la propriété de dépouiller l'eau de chaux.

En traitant quatre pouzzolanes de provenances différentes par l'acide chlorhydrique pur, au bain-marie, pendant 2 heures, M. Landrin a obtenu les résultats suivants :

| MATIÈRES DOSÉES. | | Réunion Éch. n° 1. | Réunion Éch. n° 2. | Italie. | Paris. |
|---|---|-----------------------|-----------------------|---------|--------|
| Eau. | | 8,75 | 12,40 | 11,75 | 1,35 |
| Partie soluble dans l'acide chlorhydrique. | | 50,45 | 55,50 | 55,15 | 7,75 |
| — insoluble — — — — — | | 60,80 | 52,10 | 53,10 | 90,90 |
| L'analyse des parties solubles et insolubles leur a assigné la composition suivante : | | | | | |
| Partie soluble. | Silice | 1,90 | 1,15 | 0,45 | 0,25 |
| | Alumine et oxyde de fer. | 25,80 | 31,90 | 25,85 | 4,55 |
| | Chaux. | 2,60 | 1,50 | 5,60 | 2,25 |
| | Magnésie. | 1,40 | 0,85 | 2,50 | 0,60 |
| | Alcalis, matières non dosées et pertes. . . | 0,75 | 0,12 | 0,75 | 0,12 |
| | | 50,45 | 55,50 | 55,15 | 7,75 |
| Partie insoluble. | Silice | 41,70 | 37,80 | 44,70 | 74,80 |
| | Alumine et oxyde de fer. | 10,60 | 7,56 | 2,25 | 15,80 |
| | Chaux. | 6,05 | 5,20 | 4,05 | 1,80 |
| | Magnésie. | 1,20 | 5,05 | 1,36 | 0,06 |
| | Alcalis, matières non dosées et pertes. . . | 1,16 | 0,49 | 0,74 | 0,44 |
| | | 60,80 | 52,10 | 53,10 | 90,90 |

Les chiffres de ce tableau montrent que la presque totalité de la silice se retrouve dans la partie insoluble; mais toute cette silice insoluble ne possède pas également

1. Comptes rendus à l'Académie des sciences, février 1883.

la propriété hydraulique ; autrement, il faudrait en conclure que la pouzzolane artificielle de Paris, qui est la plus riche en silice, est aussi la plus hydraulique ; tandis qu'en réalité, elle ne donne que des mortiers hydrauliques de qualité médiocre.

M. Landrin a donc été amené à rechercher la silice hydraulique dans la partie insoluble qu'il a mise en présence de l'eau de chaux pendant 24 heures seulement. Ses essais ont porté sur 0^m,3 de matière, et pour comparer les résultats obtenus avec ceux que donne le procédé Vicat, il a en même temps soumis les pouzzolanes elles-mêmes à l'action de l'eau de chaux dans les mêmes conditions que leurs insolubles.

Les quantités de chaux absorbées ont été les suivantes :

| MATIÈRES TRAITÉES. | Réunion N° 1. | Réunion N° 2. | Italie. | Paris. |
|-------------------------------------|------------------|------------------|---------|--------|
| Pouzzolanes. | 0,0017 | 0,0031 | 0,0017 | 0,0017 |
| Insolubles des Pouzzolanes. | 0,0224 | 0,0596 | 0,0404 | 0,0025 |

Ces derniers chiffres mettent en évidence la rapidité d'action des insolubles des pouzzolanes sur l'eau de chaux par rapport à celle des pouzzolanes elles-mêmes. En outre, tandis que le traitement des quatre échantillons par l'eau de chaux n'accuse, au bout de 24 heures, aucune différence, au moins pour trois d'entre eux, le même traitement appliqué aux insolubles leur attribue, au contraire, d'accord avec l'expérience, des valeurs hydrauliques très différentes.

En étudiant la manière dont se comportent les pouzzolanes avec les chaux grasses et les chaux hydrauliques, on reconnaît que les matières pouzzolaniques au plus haut degré donnent de meilleurs résultats avec les chaux grasses qu'avec les chaux hydrauliques, et inversement, les pouzzolanes médiocres sont préférables aux premières quand elles doivent être mélangées avec des chaux hydrauliques.

Ces résultats s'expliquent, par ce fait que la propriété hydraulique dépend de la proportion de silice et d'alumine par rapport à la chaux. Nous reviendrons plus loin sur cette question à propos de la solidification des mortiers.

La conservation des pouzzolanes exige peu de soin ; toutefois, comme une pouzzolane bien sèche peut influer sur la rapidité de la prise des mortiers, il convient de les conserver sous des hangars à l'abri de l'humidité.

ANALYSE

DES CHAUX, CEMENTS ET POZZOLANES

1° *Analyse des chaux et ciments.* — La détermination des divers éléments dont se compose un échantillon de chaux ou de ciment résultant de la cuisson d'un calcaire peut se faire par des procédés analogues à ceux que nous avons indiqués pour l'analyse des calcaires ; mais, quand il s'agit de matières hydrauliques, il est très important de connaître l'état chimique des différents éléments ; l'analyse devient, dès lors, un peu plus compliquée et ne fournit même pas, dans l'état actuel de la science chimique, des résultats suffisamment complets ; elle ne permet pas, par exemple, de déterminer la proportion des silicates multiples et fusibles qui se sont formés pendant la cuisson, et qui ne peuvent se distinguer chimiquement du silicate et de l'aluminate de chaux ; l'aspect du ciment, après sa cuisson, peut seule donner une indication sur la proportion plus ou moins grande de ces silicates fusibles.

D'après Rivot, l'analyse des chaux hydrauliques et ciments doit comporter les opérations suivantes :

1° On calcine au rouge vif et on constate la perte de poids, laquelle comprend l'eau et l'acide carbonique ; l'acide carbonique se dose isolément en opérant sur un autre échantillon de la matière, comme nous l'avons indiqué à propos de l'analyse des calcaires.

2° On introduit 4 à 5 grammes de matière porphyrisée dans une grande fiole à peu près remplie d'eau distillée, récemment bouillie, qu'on ferme avec soin pour empêcher l'action de l'acide carbonique de l'air. On laisse l'eau agir pendant trois jours au moins, en ayant soin d'agiter fréquemment pour éviter la prise de la chaux ou du ciment.

L'eau dissout la chaux caustique ou hydratée et le sulfate de chaux, mais elle agit aussi, du moins en partie, sur l'aluminate en lui enlevant un peu de chaux. C'est une cause sérieuse d'incertitude au point de vue de l'appréciation, par l'analyse, des qualités hydrauliques de la matière essayée. Pour empêcher cette décomposition partielle de l'aluminate, il convient d'employer une quantité d'eau relativement faible et de ne pas prolonger son action au delà de deux jours. On est exposé, dans ce cas, il est vrai, à ne dissoudre qu'une partie du sulfate de chaux, mais cette cause d'erreur doit être considérée comme un inconvénient de moindre importance.

La dissolution est divisée en deux parties : dans l'une, on dose la chaux, tandis

que l'autre sert à déterminer l'acide sulfurique, d'où l'on déduit le sulfate de chaux.

Dans le cas où la proportion de sulfate de chaux est un peu notable, le résidu du traitement par l'eau est utilisé pour les opérations suivantes ; dans le cas contraire, on peut opérer directement sur la matière elle-même ; nous pouvons donc admettre, pour les recherches subséquentes, que l'acide sulfurique est éliminé, ou ne se trouve qu'en quantité négligeable.

5° On traite 3 ou 4 grammes de la matière par l'acide nitrique, on évapore à sec, et on reprend par le même acide. Dans la liqueur, on dose l'oxyde de fer, l'alumine, la chaux et la magnésie par les méthodes indiquées pour l'analyse des calcaires. Quant à la partie insoluble dans l'acide, elle contient : la silice des silicates formés pendant la cuisson, le sable resté inerte et quelquefois de l'argile qui n'a pas été attaquée par la chaux.

Après avoir pesé ce résidu, on le traite par une dissolution faible de potasse qui ne dissout que la silice des silicates. Une nouvelle pesée donne le poids de l'argile et du sable, d'où l'on déduit par différence le poids de la silice.

Lorsque le dernier résidu contient une proportion d'argile appréciable, ce dont on peut s'assurer facilement par un examen à la loupe, il peut y avoir une certaine incertitude sur les quantités de silice et d'alumine précédemment dosées et supposées combinées à la chaux ; une portion inconnue de ces deux corps peut également provenir de l'argile inerte partiellement attaquée par l'acide nitrique. Il en est très rarement ainsi, et, dans la plupart des cas, le résidu insoluble dans la potasse se compose exclusivement de sable quartzeux ou, du moins, ne contient qu'une proportion d'argile assez faible pour ne laisser aucune incertitude sur les résultats de l'analyse.

Une difficulté d'un autre genre se présente quand la matière à analyser contient une quantité notable de magnésie. Cette base étant à peu près insoluble dans l'eau, il n'est pas possible de distinguer la portion de magnésie à l'état libre de celle qui est combinée avec la silice ou avec l'alumine. Cette distinction n'offrirait, d'ailleurs, qu'un intérêt purement scientifique, car, pour les motifs indiqués précédemment, on évite généralement, dans les constructions, l'emploi des produits hydrauliques magnésiens.

L'analyse étant faite, si la chaux ou le ciment ne contient qu'une quantité insignifiante de magnésie, on déduira du poids total de la chaux : d'une part, les parties qui se trouvent à l'état de carbonate et de sulfate d'après les chiffres obtenus pour l'acide carbonique et l'acide sulfurique ; d'autre part, la portion de chaux existant à l'état caustique ou à l'état d'hydrate et qui a été dissoute dans l'eau. Le reste de la chaux peut être alors considérée comme combinée avec la silice et avec l'alumine.

On peut encore avoir la composition approximative de l'aluminate de chaux, en comparant les quantités de chaux soluble dans l'eau, soit que l'on emploie relativement peu de liquide, soit que l'on fasse agir l'eau en grand excès ; dans les deux cas, il faut naturellement faire la déduction de la chaux dissoute à l'état de sulfate.

Cette discussion des résultats de l'analyse permet, en général, d'obtenir, avec une certaine approximation, les compositions du silicate et de l'aluminate de chaux,

telles qu'elles peuvent être modifiées par l'eau, au moment de la prise. — Au point de vue pratique, ces proportions présentent naturellement plus d'intérêt que celles des mêmes composés, immédiatement après la cuisson.

2° *Analyse des pouzzolanes.* — La méthode, indiquée par Rivot, pour l'analyse des pouzzolanes, consiste à attaquer par l'acide nitrique pur et concentré 5 grammes de la matière, amenée par la pulvérisation au degré de finesse adopté pratiquement pour la fabrication des mortiers. Après une action, d'une durée de 24 heures environ, à une température de 50 à 60°, on évapore à sec et l'on reprend par l'acide nitrique étendu.

Dans la liqueur acide ainsi obtenue, on dose l'alumine, l'oxyde de fer, la chaux, la magnésie et les alcalis. Quant au résidu insoluble, après l'avoir calciné et pesé, on le fait digérer, pendant 12 heures, dans une dissolution faible de potasse chauffée à 40° environ; on le lave avec soin, on le calcine et on le pèse à nouveau. La différence entre les deux pesées est considérée comme représentant la silice rendue soluble par les actions successives de l'acide et de l'alcali. Ce résultat est utile à connaître, car il donne un indice de l'énergie de la pouzzolane.

Pour compléter l'analyse, on doit déterminer la composition de la partie du silicate inattaquée par les deux réactifs précédents. On la mélange, à cet effet, avec un poids égal de chaux parfaitement pure, et on chauffe au rouge vif.

Après refroidissement, on traite par l'acide nitrique et on dose la silice et les bases. Le poids de chaux obtenu doit être naturellement diminué de celui qui a été ajouté pour rendre le silicate attaquant.

Ainsi que le fait remarquer Rivot, ces procédés d'expérimentation ne peuvent fournir que des termes de comparaison entre les différentes substances qui peuvent être employées comme pouzzolanes.

S'il s'agissait de déterminer le mode d'action de la chaux sur les pouzzolanes, à la température ordinaire et au contact de l'eau, il faudrait recourir à des expériences qui exigeraient un temps très long et qui ne donneraient pas encore des résultats précis; car l'analyse serait impuissante pour faire reconnaître, à un moment donné, la proportion du silicate et de l'aluminat de chaux hydratés existant dans le mortier.

DES MORTIERS

Généralités. — On donne le nom de mortier à une matière qui sert à relier entre eux les matériaux qui composent une maçonnerie, ou à en recouvrir les parements extérieurs.

Les mortiers doivent avoir, au moment de l'emploi, la consistance d'une pâte assez molle pour bien remplir tous les intervalles entre les matériaux. Ils doivent adhérer fortement à ceux-ci et acquérir, au bout d'un certain temps, une dureté comparable à celle de la pierre, de manière que la maçonnerie tout entière puisse être considérée comme une sorte de monolithe. Enfin, pour que la construction soit durable, il faut que le mortier résiste aux agents de destruction auxquels il est exposé ; il est donc essentiel de tenir compte, dans la composition des mortiers, de la nature et du mode d'action de ces agents destructeurs.

Nous allons nous occuper spécialement des mortiers à base de chaux ou de ciment, c'est-à-dire des mélanges, en proportions variables, de ces éléments constitutifs avec des sables ou des matières pouzzolaniques. Il convient donc de dire préalablement quelques mots des sables et de leur rôle dans les mortiers.

DES SABLES.

Les sables proviennent de la désagrégation des roches siliceuses, granitiques ou basaltiques, des grès ou des calcaires arénacés, et renferment, par suite, les mêmes éléments que les roches qui leur ont donné naissance.

On appelle *gros sable* celui dont les grains ont des dimensions comprises entre 1 1/2 et 3 millimètres, et *sable fin* celui dont les dimensions varient entre 1/2 et 1 millimètre. Les roches, en se désagréant, produisent souvent des poussières impalpables qui, mélangées avec les sables, les rendent gras, c'est-à-dire susceptibles d'acquérir une certaine consistance lorsqu'ils sont détrempés avec l'eau. On distingue les sables des poussières, en ce que les poussières troublent l'eau dans laquelle on les agite, tandis que les sables se précipitent sur-le-champ sans altérer sensiblement la transparence de l'eau.

Les sables entraînés par les rivières peuvent être mélangés de substances terreuses ; une proportion relativement faible de ces substances peut rendre un sable impropre à la fabrication des mortiers, car l'argile n'adhère pas à la chaux et nuit par conséquent à la cohésion du mortier. On reconnaît qu'un sable contient une

quantité un peu forte d'argile, quand, après une légère humectation, il fait pelote dans la main.

Les chaux n'exercent aucune action chimique appréciable sur les sables et on peut dire que le rôle de ceux-ci est purement mécanique. L'emploi du sable, tout en diminuant le prix de revient du mortier, augmente sa dureté et s'oppose au retrait qui tend toujours à se produire au moment du durcissement de la chaux.

La forme et la grosseur des grains peuvent avoir une certaine influence sur le degré de cohésion des mortiers. Les sables, rudes au toucher, à grains anguleux, adhèrent naturellement mieux, par leurs aspérités, avec la gangue que les sables à grains polis et arrondis.

Quant à la grosseur des grains, elle doit dépendre de la nature de la chaux employée. Avec la chaux grasse, la propre cohésion de la chaux est plus grande que son adhérence au sable: il y a par suite avantage à choisir un sable qui donnera, pour un volume déterminé, une surface de grain aussi faible que possible, c'est-à-dire un sable à gros grains.

Pour la chaux hydraulique, le contraire a lieu, parce que le durcissement, conséquence des réactions chimiques qui caractérisent la prise de cette chaux, se fait par un travail moléculaire lent; c'est là un phénomène absolument semblable à celui qui se produit quand, au moyen d'une source calcaire, on détermine une incrustation sur un objet; la densité et par suite la cohésion de la matière déposée croît au fur et à mesure que l'on approche du corps incrusté. Dès lors, il convient, surtout avec une chaux très hydraulique, de prendre un sable fin.

Cependant, si le sable était trop fin, la partie de la surface de chaque grain, comprise entre les intervalles des cristaux produits par les réactions chimiques de la prise, deviendrait une fraction notable de la surface totale des grains et l'adhérence de celui-ci à la gangue pourrait être assez faible. C'est ainsi qu'un mortier fait avec une poussière siliceuse, ne présente aucune solidité¹.

Quant au mortier de ciment, les phénomènes analogues à ceux d'incrustation ne peuvent se produire, en raison de la rapidité de la prise. L'enchevêtrement des cristaux donne à la matière même du ciment une très forte cohésion qui peut l'emporter sur son adhérence au sable. A cet égard, il y a lieu, comme pour les chaux grasses, de donner la préférence au gros sable.

On distingue plusieurs espèces de sable, suivant les gisements d'où ils proviennent :

Les sables *vierges* ou *arènes* se rencontrent parmi les roches actuellement en voie de décomposition. Ces sables n'ont pas été transportés par les eaux et sont souvent mélangés à une certaine quantité d'argile qui leur communique les propriétés de pouzzolanes.

Les sables *fossiles* sont des sables qui ont été entraînés et déposés par les eaux à une époque antérieure à la période actuelle. Leur grain anguleux, inégal, les fait rechercher pour les constructions, quand ils ne sont pas mélangés d'argile.

Les sables *de rivière* sont ceux que les cours d'eau charrient encore aujourd'hui depuis leur source jusqu'à la mer. Ils sont assez purs, surtout quand le courant est rapide; mais les grains, par suite de leur frottement continu, sont généralement lisses et arrondis.

1. Cognin, *Annales de l'Instruction*, 1884.

Le *sable de mer* est toujours imprégné de sels déliquescents, qui ne nuisent pas à la cohésion du mortier, mais qui entretiennent l'humidité dans les maçonneries. Cette propriété des sables de mer est un inconvénient sérieux pour la construction des murs des maisons d'habitation ; on peut cependant les employer encore dans ce cas, à la condition de les laisser exposés à la pluie pendant plusieurs mois, afin de les débarrasser des sels déliquescents.

EXTINCTION DE LA CHAUX.

Les chaux grasses, aussi bien que les chaux hydrauliques, doivent être amenées à l'état de pâte ferme avant d'être incorporées aux éléments qui entrent dans la composition des mortiers. Cette opération constitue ce que l'on appelle l'extinction de la chaux.

On distingue deux modes d'extinction : le premier consiste à ajouter immédiatement à la chaux toute l'eau qui lui est nécessaire pour donner un hydrate en pâte ; tandis que le second consiste à ne lui incorporer d'abord que la quantité d'eau suffisante pour donner l'hydrate en poudre ; c'est seulement plus tard qu'on lui ajoute le complément nécessaire pour obtenir l'hydrate en pâte.

Le premier mode d'extinction est connu généralement sous le nom de procédé *ordinaire*, ou procédé d'*extinction à grande eau*, ou *extinction par fusion*. Il consiste à verser sur la chaux une quantité d'eau juste suffisante pour la transformer en pâte consistante.

Quand on n'a qu'une petite quantité de chaux à éteindre, on se contente de la placer sur une aire bien unie et d'y répandre l'eau nécessaire, après l'avoir entourée d'une petite bordure, formée avec le sable qui doit entrer dans la composition du mortier.

Dans les grands chantiers, on établit sous un hangar au moins deux bassins contigus, afin que les travaux puissent marcher sans interruption. Ces bassins, auxquels on donne de 0^m,50 à 0^m,60 de profondeur, sont creusés dans un sol peu perméable que l'on peut, au besoin, revêtir en planches ou en maçonnerie.

La chaux vive étant étendue dans l'un des bassins sur une couche de 0^m,20 à 0^m,25 d'épaisseur, on y fait arriver la quantité d'eau nécessaire pour affleurer cette couche. Au bout de quelques minutes, si la chaux n'est pas paresseuse (suivant l'expression usitée), on voit les morceaux se fendiller avec bruit, s'entr'ouvrir et se désagréger complètement en dégageant de la vapeur. On superpose une seconde couche semblable à la première et l'on ajoute assez d'eau pour affleurer cette seconde couche. En opérant ainsi, l'extinction est généralement complète au bout de 24 heures et on obtient une pâte bien homogène et d'une consistance convenable. Il est toutefois utile de surveiller la marche de l'extinction. Si l'on ajoute trop d'eau, la chaux se réduit en une bouillie claire, se trouve noyée, comme disent les maçons, et perd beaucoup de sa qualité. Si l'eau vient à manquer en certains points, il faut bien se garder d'y projeter de l'eau froide, car la chaux, subitement refroidie au milieu de sa combinaison avec l'eau, tomberait en grumeaux qu'il serait ensuite impossible de réduire en pâte. On doit, dans ce cas, amener lentement l'eau

échauffée qui se trouve en excès sur d'autres points, en traçant sur la pâte avec un bâton de petites rigoles d'écoulement.

On s'assure encore de la régularité de marche de cette opération en enfonçant un bâton dans les différentes parties de la masse. S'il en sort recouvert d'une chaux gluante, l'opération est complète ; si, au contraire, il s'échappe des trous faits par le bâton une vapeur épaisse, c'est un indice que l'eau a manqué aux points correspondants ; il faut alors élargir le trou et y amener lentement de l'eau au moyen d'une rigole.

Lorsque toute effervescence a cessé, la chaux forme une bouillie claire ; mais l'extinction continue, les petits grumeaux s'hydratent et ce n'est qu'au bout de 24 heures que l'on obtient une pâte ferme qui se coupe au louchet. Cette pâte se nomme *chaux fondue*, *coulée* ou *fusée*.

L'extinction de la chaux grasse ne réclame pas les mêmes précautions que l'extinction de la chaux hydraulique. Avec la chaux grasse, on peut hâter la dernière période d'extinction en brassant la matière ; il faut, au contraire, éviter de recourir à ce moyen quand on éteint des chaux hydrauliques. Les incuits ou biscuits qui ne se sont pas fondus dans la pâte doivent être extraits et rejetés, car en s'hydratant ultérieurement, après la prise du mortier, ils pourraient être une cause de désagrégation des maçonneries.

La chaux grasse en pâte, recouverte d'une couche de sable, peut, ainsi que nous l'avons déjà dit, se conserver très longtemps sans altération ; on peut donc, sans inconvénient, en éteindre de grandes quantités à la fois. Mais, quand on emploie des chaux hydrauliques, il ne faut en éteindre que la quantité nécessaire à la consommation d'une journée ou de deux au plus. La chaux hydraulique en pâte se durcit en effet très rapidement et ne peut plus être ensuite ramenée à l'état de pâte molle.

En résumé, ce mode d'extinction est très simple lorsqu'on l'applique aux chaux grasses. Appliqué aux chaux hydrauliques, il offre, au point de vue de la résistance des mortiers, des avantages sur lesquels nous reviendrons plus loin, mais il exige, dans ce dernier cas, des ouvriers habiles et soigneux.

Le second mode d'extinction, qui doit donner comme résultat de l'hydrate de chaux en poudre, peut se pratiquer de différentes manières. Parmi les procédés en usage, on distingue l'*extinction par immersion*, l'*extinction par aspersion* et l'*extinction spontanée*.

Extinction par immersion. — On place la chaux vive, après l'avoir concassée, dans des paniers à claire-voie qu'on immerge dans l'eau pendant quelques secondes ; on la retire avant qu'elle ait fusé et on la verse dans un bassin où les morceaux éclatent avec sifflement en dégageant des vapeurs et finalement tombent en poudre.

Ce procédé, incommode et incertain dans ses résultats, est rarement pratiqué en grand. On emploie, de préférence, le procédé par aspersion, qui donne des résultats plus sûrs et exige moins de soins.

Extinction par aspersion. — Au lieu de plonger la chaux dans l'eau, on la dispose sur une aire en petits tas de 2 à 3 hectolitres et on arrose chacun de ces tas avec une quantité d'eau que l'on peut déterminer par une expérience prélimi-

naire et qui doit être juste suffisante pour amener la chaux à l'état d'hydrate en poudre.

Lorsque l'effervescence a cessé, on enfonce dans le tas un bâton ferré pour reconnaître l'état d'avancement de l'opération. Si l'on rencontre des morceaux résistants, il faut élargir le trou et y verser une petite quantité d'eau. Lorsque la masse se laisse également pénétrer en tous sens, on peut considérer l'opération comme terminée ; toutefois, l'extinction n'est réellement complète et la chaux n'est réduite en poudre impalpable qu'au bout de 12 heures.

Extinction spontanée. — Ce procédé consiste à abandonner à l'air la chaux vive concassée, qui absorbe la vapeur d'eau et l'acide carbonique contenus dans l'atmosphère et qui, en s'hydratant, se réduit en poudre d'une grande finesse. Il ne faut pas moins de trois mois pour que l'extinction spontanée soit complète sur une chaux grasse dont les pierres ont été concassées en morceaux de la grosseur d'un œuf. Au bout de ce temps, il s'est formé un sous-carbonate de chaux hydraté contenant à peu près la moitié de l'acide nécessaire à la saturation complète de la chaux. La chaux a, en même temps, absorbé 10 à 11 pour 100 d'eau.

Ce dernier procédé ne peut être appliqué qu'à l'extinction de chaux grasses ; car les chaux hydrauliques, par une exposition prolongée à l'air libre, perdent la presque totalité de leurs propriétés spéciales.

Les chaux éteintes en poudre, avant d'être mises en sacs, sont passées dans des blutoirs dont les mailles ne doivent pas avoir plus d'un demi-millimètre de largeur, car les poudres les plus fines donnent les meilleures pâtes au moment du gâchage. Cette opération permet de séparer les grappiers en grande partie constitués par des pierres ayant subi une surcuisson. Ces grappiers, soumis à une hydratation complémentaire et au broyage, peuvent être incorporés aux chaux en poudre et, loin de nuire à leur qualité, ne font que l'améliorer, en augmentant un peu leur hydraulicité.

Les chaux en poudre ne reçoivent que plus tard, au moment de l'emploi, la quantité d'eau nécessaire pour former des hydrates en pâte.

Foisonnement des chaux. — Le foisonnement des chaux et les quantités d'eau qu'elles absorbent pendant l'extinction varient, non seulement suivant leur nature, mais encore suivant le mode d'extinction.

Le tableau suivant indique les volumes de pâte obtenus avec 100 volumes de chaux vive, éteinte par les différents procédés.

| MODE D'EXTINCTION | Chaux grasse. | Chaux hydraulique. |
|--|---------------|--------------------|
| Extinction par le procédé ordinaire..... | 250 à 300 | 140 à 175 |
| — par immersion..... | 250 | 150 à 150 |
| — spontanée..... | 260 | 112 à 140 |

En général, 100 kilogrammes de chaux grasse parfaitement pure et vive donnent

0^{me},24 de pâte à bonne consistance; ce volume peut descendre à 0^{me},18 si la chaux n'est pas très pure ou si elle n'est pas employée à la sortie des fours. Entre ces limites se trouvent toutes les variations de foisonnement propres à ces espèces de chaux.

Les densités des chaux hydrauliques et leur composition sont trop variables pour permettre d'assigner, entre des limites aussi voisines, des rapports analogues aux précédents entre leur poids et leur foisonnement par l'extinction ordinaire (Vicat).

Le tableau suivant donne les résultats obtenus par MM. Claudel et Laroque pour le foisonnement de différentes chaux hydrauliques.

| DÉSIGNATION DES CHAUX. | UN MÈTRE CUBE DE CHAUX VIVE ÉTEINTE | |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | par fusion à donné en pâte. | par immersion à donné en poudre. |
| | m. c. | m. c. |
| Chaux hydraulique de Bourgogne..... | 1,550 | 1,850 |
| — — naturelle des Buites Chaumont... | 1,500 | 1,780 |
| — — artificielle — — | 1,590 | 1,750 |
| — — d'Issy..... | 1,620 | " |
| — — naturelle des Moulineaux..... | 1,470 | " |
| Chaux moyennement hydraulique de la Hève..... | 1,750 | 2,000 |
| Chaux du Theil..... | " | 1,240 |

La chaux éteinte en poudre donne, par le gâchage, un volume de pâte constante qui varie de 60 à 80 pour 100 du volume de la chaux en poudre.

Quant aux quantités d'eau absorbées par la transformation en pâte de 100 kilos de chaux vive, elles sont les suivantes, d'après Vicat

| MODE D'EXTINCTION | Chaux grasse. | Chaux hydraulique. |
|---|------------------|--------------------|
| Extinction par le procédé ordinaire | 291 ^k | 105 |
| — par immersion..... | 172 | 71 |
| — spontanée..... | 188 | 68 |

La chaux en poudre retient 18 à 20 pour 100 d'eau, si elle est grasse, et de 20 à 30 pour 100, si elle est hydraulique.

INFLUENCE DU MODE D'EXTINCTION DE LA CHAUX SUR LA QUALITÉ DES MORTIERS.

D'après Vicat, les chaux grasses, éteintes spontanément par une exposition prolongée à l'air, font, avec le sable, de meilleurs mortiers que les chaux éteintes artificiellement; mais la lenteur du procédé ne permet pas d'y avoir recours dans les applications. D'après d'autres ingénieurs, au contraire, les chaux ainsi éteintes, se

trouvant partiellement carbonatées, doivent présenter les inconvénients des chaux imparfaitement cuites.

Les chiffres que nous avons donnés plus haut montrent que l'extinction par immersion permet d'obtenir une pâte qui, à égale consistance, est plus riche en chaux que la pâte obtenue par le procédé ordinaire. Les différences, assez sensibles avec les chaux grasses, le sont beaucoup moins avec les chaux hydrauliques et varient ordinairement avec leur degré d'hydraulicité.

Or comme, dans les mortiers de chaux grasse, la pâte de chaux abandonnée, en durcissant, la presque totalité de l'eau non combinée qu'elle avait absorbée pendant l'extinction; comme, d'un autre côté, le sable s'oppose au retrait de la chaux, la densité du mortier et, par suite, sa cohésion seront d'autant plus faibles que la quantité d'eau employée pour l'extinction aura été plus considérable. Il résulte de là que l'extinction par immersion doit être préférée pour la préparation des mortiers de chaux grasse employés dans la construction de maçonneries exposées à l'air et aux intempéries.

Pour les chaux éminemment hydrauliques, comme la différence entre les quantités d'eau incorporées à la chaux par les deux procédés d'extinction est assez faible, il y a lieu de donner la préférence au procédé qui amène la chaux à un plus grand état de division. Sous ce rapport, le procédé ordinaire paraît donner de meilleurs résultats, et c'est pourquoi il est recommandé en première ligne pour les chaux hydrauliques.

DE L'EAU A EMPLOYER POUR L'EXTINCTION DES CHAUX.

Il est important de choisir une eau bien pure pour l'extinction des chaux. Sous ce rapport, l'eau de rivière est préférable, en général, aux eaux qui ont filtré à travers les terres et qui contiennent une forte proportion de sels en dissolution. En particulier, l'emploi d'eaux séléniteuses, telles que les eaux de puits de certains quartiers de Paris, est nuisible à la qualité des mortiers et ralentit leur solidification. On atténue le mauvais effet de la crudité des eaux de puits en les laissant exposées pendant quelque temps à l'air.

Les eaux croupissantes des marais et celles qui coulent dans les ruisseaux des rues doivent être également proscrites.

L'eau de mer ou les eaux saumâtres ne paraissent pas avoir une influence bien certaine sur la résistance des mortiers. M. Chatoney est d'avis que l'emploi de ces eaux retarde la prise; tandis que les expériences de M. Fébunier tendent à démontrer qu'il n'en est rien.

M. Frontault et Sadowski ont confectionné des blocs avec des mortiers gâchés à l'eau douce additionnée de 15 kilogrammes de sel par mètre cube d'eau. Ces blocs ont paru avoir une résistance plus grande que ceux qui avaient été fabriqués à l'eau douce sans addition de sel; mais ces résultats ne sont pas entièrement concluants.

M. Gratien Lepère, dans son recueil d'expériences faites à Cherbourg, donne la préférence à l'eau de mer pour l'extinction de la chaux destinée à la confection des bétons.

Smeaton, à la suite d'expériences multiples qu'il a entreprises sur les mortiers, lors de la construction du phare d'Eddystone, a conclu à la supériorité de l'eau de mer sur l'eau douce pour la fabrication des mortiers.

Dans les importants travaux exécutés à Flessingue, les mortiers de trass aussi bien que les mortiers ordinaires, fabriqués avec l'eau de mer, ont acquis une dureté telle que les vagues qui venaient battre les maçonneries usaient et corrodait les briques sans attaquer les joints. M. le général Michaud a obtenu un résultat analogue à l'île d'Elbe.

Il est donc possible que l'emploi de l'eau de mer puisse être avantageux dans certains cas ; mais, en tout état de cause, on doit le proscrire dans tous les mortiers destinés à la construction des maisons, attendu que les sels déliquescents de la mer attirent l'humidité, produisent des efflorescences et rendent les habitations malsaines.

DOSAGE DES MORTIERS DE CHAUX.

Le dosage des matières qui doivent entrer dans la composition d'un mortier, est une opération très importante quand on a à entreprendre de grands travaux de construction. Il faut, en effet, rechercher la composition qui donnera les meilleurs résultats avec la plus faible dépense possible.

Cette recherche est assez délicate, car les proportions de chaux et de sable les plus convenables, dans chaque cas, doivent dépendre de la nature même de ces deux éléments ainsi que de l'usage auquel est destiné le mortier.

En principe, le volume de chaux à employer ne doit pas être moindre que celui des vides qui existent entre les grains de sable. Quant au volume des vides, il varie, non seulement avec le degré de tassement du sable, mais encore avec son degré d'humectation. Lorsque le sable n'est point tassé, une légère humectation a pour effet de gêner le glissement des grains de sable les uns sur les autres et, par suite, le volume des vides est plus grand dans un sable un peu humide que dans un sable tout à fait sec. Cependant, si la quantité d'eau ajoutée au sable, croissant toujours, vient à dépasser une certaine limite, le frottement des grains les uns sur les autres commence à diminuer et le sable se tasse de plus en plus jusqu'à la saturation complète. En d'autres termes, il existe un degré d'humectation qui correspond à un maximum de foisonnement du sable.

Ce fait se trouve établi par les chiffres que M. Cugnin a obtenus pour les densités d'un sable amené à différents degrés d'humectation.

Le sable expérimenté était du sable de Seine tamisé, dont la grosseur des grains était comprise entre 1 millimètre et 2^{mm},2.

Poids d'un litre de sable.

| | | |
|--|---|---------------------|
| Sable très sec. | | 1 ^k ,414 |
| Sable mélangé avec 20 grammes d'eau. . . | | 1 ^k ,385 |
| — 50 — | — | 1 ^k ,361 |
| — 40 — | — | 1 ^k ,349 |
| — 50 — | — | 1 ^k ,327 |

A partir de ce point, la densité a commencé à croître, mais lentement; avec 100 grammes d'eau, elle n'était encore que $1^{\text{e}},565^{\text{e}}$.

Pour déterminer le volume des vides d'un sable donné, on prend un litre de ce sable très sec et on verse de l'eau jusqu'au point de saturation, c'est-à-dire jusqu'au moment où l'eau atteint la surface libre du sable. Lorsque l'on est arrivé à ce point, le sable s'est complètement tassé et le volume d'eau ainsi ajouté représente le vide minimum.

Si l'on continue à verser de l'eau jusqu'au remplissage complet de la mesure du litre, la quantité totale d'eau versée représente le volume primitif des vides du sable sec et la différence entre ces deux volumes correspond au tassement maximum du sable.

En opérant sur des sables de Seine, à grains uniformes, mais variables de grosseur d'un sable à l'autre, M. Cugnin a constaté que dans un sable sec et non tassé, le volume des vides était sensiblement égal à 0,45 du volume total et indépendant de la grosseur des grains.

Le sable de Seine, simplement passé à travers un tamis ayant des mailles de 2 millimètres, et par conséquent composé de grains irréguliers, n'a donné que 0,59 comme vide, ce qui s'explique par l'entassement des grains.

Quant au volume minimum des vides, il a été trouvé sensiblement constant et égal à 0,50 dans le premier cas, et 0,25 seulement dans le second cas.

Un mortier qui peut être proposé comme type, est celui dans lequel la pâte de chaux arrive à remplir exactement tous les intervalles existant entre les grains de sable. Dans un pareil mortier, en effet, la cohésion est aussi parfaite que possible, avec un emploi de chaux réduit au minimum. Pratiquement, la proportion de chaux doit être supérieure à cette limite pour parer aux imperfections du mélange et au délavage par l'eau de pluie, quand le mortier doit être exposé à l'air libre avant la prise. La dose de chaux doit même être très notablement augmentée, si le mortier encore frais doit être immergé dans l'eau.

D'après les proportions de chaux employée, les mortiers sont classés en 5 catégories :

1^o Les mortiers gras, dans lesquels le volume de chaux en pâte dépasse 500 litres par mètre cube de sable et qui contiennent par conséquent un fort excédent de chaux. Ces mortiers servent notamment pour la confection des bétons coulés sous l'eau;

2^o Les mortiers moyens, dans lesquels le volume de pâte varie de 400 à 500 litres par mètre cube de sable, et où la pâte a encore un volume supérieur au vide du sable augmenté de 1 dixième;

3^o Enfin, les mortiers maigres, dans lesquels le volume de la pâte est inférieur au volume des vides du sable.

En général, dans la composition des mortiers de chaux grasses, il vaut mieux pécher par défaut de chaux que par excès; mais avec les chaux hydrauliques, c'est le contraire qui doit avoir lieu.

Les chaux grasses, qui foisonnent beaucoup plus que les chaux hydrauliques,

1. *Recherches sur le dosage des mortiers. Annales de la construction*, 1881.

s'emploient ordinairement dans la proportion d'un volume de chaux en pâte contre deux volumes de sable.

Dans les mortiers de chaux hydrauliques, la proportion moyenne du sable est de 1 vol. 800 pour 1 volume de chaux en pâte. Pour les mortiers destinés à l'immersion, il est bon de ne pas employer plus de 1 vol. 500 de sable. La proportion de sable peut être portée à 1,800 et même 2, dans les mortiers pour enduits. Enfin, quand il s'agit de mortiers pour fondations sous terre fraîche, on peut employer jusqu'à 2,40 de sable pour 1 volume de chaux en pâte sans nuire à la cohésion définitive du mortier.

Il est, d'ailleurs, important de déterminer, dans chaque cas, toutes les données relatives à la fabrication des mortiers, sans trop se fier à l'analogie.

Pendant la fabrication du mortier, le sable, étant nécessairement un peu mouillé, doit se trouver dans les conditions qui correspondent au maximum de foisonnement. Toutefois, ce foisonnement est atténué par la compression qui résulte de la manipulation du mortier et, avec certains appareils, on peut même amener le sable au degré de tassement qui correspond au sable saturé d'eau.

Dans les conditions ordinaires, on peut admettre que la petite compression que subit le sable, pendant la fabrication du mortier, compense l'augmentation de volume qui résulterait de son humectation et, par suite, que l'espacement des grains dans le mortier est sensiblement le même que dans le sable sec non tassé.

RENDEMENT EN MORTIER.

On appelle rendement en mortier d'un mélange de chaux et de sable le rapport du volume du mortier obtenu au volume du sable employé.

Lorsque le sable, au moment du dosage, est sec et non tassé et que l'on a préalablement déterminé le volume V des vides de ce sable par mètre cube, on peut facilement calculer le rendement en mortier d'un mélange de ce sable avec différentes proportions de chaux. Il suffit, en effet, d'ajouter au plein du sable, c'est-à-dire à la quantité $(1 - V)$, le volume de chaux A à employer par mètre cube de sable, augmenté d'une faible quantité d'eau a nécessaire pour obtenir un mortier à bonne consistance, quantité qui dépend du plus ou moins d'hydraulicité de la chaux et de la grosseur des grains de sable, et qui représente ordinairement 8 à 10 pour 100 du volume du sable.

Quand le mortier n'est pas soumis à une compression au moyen d'appareils spéciaux, les grains de sable restent sensiblement à la même distance les uns des autres pendant la manipulation, et par suite, le rendement ne peut être inférieur à l'unité. L'expression $1 - V + A + a$ ne représentera donc le rendement réel que si elle fournit une quantité supérieure à l'unité; dans le cas contraire, elle indique que la proportion de chaux admise n'est pas suffisante pour remplir les vides du sable : c'est le cas des mortiers maigres.

Il est à remarquer, toutefois, que si le sable ne se trouvait pas à l'état sec et non tassé au moment de son emploi, cette règle ne serait plus applicable. En particulier, si ce sable était légèrement humide et non tassé, c'est-à-dire dans l'état qui correspond au minimum de densité, il éprouverait un certain retrait pendant le gâchage

et le rendement pourrait être inférieur à l'unité. Si, au contraire, le sable était très tassé, tassement qui se produit toujours quand le sable est très humide, il se produirait un foisonnement assez notable pendant le mélange avec la chaux.

Il résulte de là que le dosage du sable à l'état humide ou tassé est avantageux au point de vue du rendement en mortier, mais il peut être préjudiciable à la compacité du mortier, puisqu'il a, en définitive, pour conséquence de diminuer la proportion de chaux par rapport au sable.

PRÉPARATION DES MORTIERS DE CHAUX.

Les soins apportés à la préparation des mortiers exercent une très grande influence sur leur qualité. Un bon malaxage ou gâchage des matières mises en œuvre est essentiel pour obtenir des mortiers homogènes, résistants et d'une prise régulière.

Le mélange et la trituration des matières s'effectuent, soit à bras, soit à l'aide d'appareils mus par des chevaux ou des machines, suivant l'importance des quantités de mortier à préparer.

1° Manipulation à bras. — Cette préparation nécessite l'emploi de pelles, de pilons ou de rabots.

Le pilon est une petite masse en fonte de forme ellipsoïdale, pesant environ 4 kilog.

Le rabot est une sorte de houe à long manche dont le fer est fortement recourbé.

Le mélange des matières doit s'effectuer sur une aire pavée ou recouverte de planches jointives, afin que des parcelles de terre ou de matières étrangères ne viennent pas se mélanger au mortier.

Cette aire doit être abritée, dans tous les sens, sous un hangar, pour que le mortier ne soit exposé à être, ni desséché par le soleil, ni délavé par les pluies.

Lorsque la chaux a été préalablement réduite en pâte ferme, après avoir déposé cette chaux sur l'aire, on la bat en l'étendant, soit au pilon, soit au rabot, mais sans addition d'eau.

Si la chaux est éteinte en poudre, on l'étend en une couche de 0^m,10 d'épaisseur et on l'amène à l'état de pâte, en ajoutant peu à peu la quantité d'eau convenable et en brassant la matière avec des rabots, jusqu'à ce que la pâte soit ferme et bien homogène.

On ajoute alors à la chaux en pâte le sable par petites quantités, de manière que le mélange puisse être corroyé sans trop de difficultés et avec la plus petite quantité d'eau possible. Un arrosage trop abondant aurait pour effet de délayer la chaux et nuirait beaucoup à la cohésion du mortier.

Les mortiers hydrauliques, dit Vicat, doivent toujours être gâchés à couvert quand la saison est pluvieuse. Si le sable employé est très mouillé, on ne doit prendre que le tiers ou la moitié de la chaux en pâte ordinairement employée et remplacer ce qui manque par une quantité correspondante de la même chaux éteinte en poudre, afin de résorber l'eau du sable; sans cette précaution, on n'obtient que des mortiers délavés.

Le corroyage des matières se fait au moyen de pilons ou de rabots, jusqu'à ce qu'on arrive à un mélange aussi intime que possible.

On reconnaît qu'un mortier est bien corroyé, quand, après l'avoir laissé reposer pendant quelque temps, on ne peut plus y distinguer les éléments qui le composent.

Un mortier est amené à bonne consistance, lorsqu'il tient bien sur la truelle sans s'y affaisser.

L'emploi du pilon est préférable à celui du rabot, en ce sens qu'il permet aux ouvriers d'opérer la trituration des matières avec très peu d'eau. Mais la manipulation au pilon est incommode et dispendieuse, de sorte que l'on n'y a recours que très rarement dans la pratique.

La manipulation à bras, pour donner de bons résultats, doit être très surveillée; car les ouvriers, pour diminuer leur peine, ont toujours une tendance à noyer le mortier, en exagérant la proportion d'eau nécessaire pour le gâchage. Dans les grands chantiers, où la surveillance est nécessairement moins directe et où le prix de la confection du mortier est un élément d'une certaine importance, on a avantage à recourir à des appareils mécaniques, tels que : manèges ou tonneaux broyeurs de divers systèmes.

Manipulation au manège à roues. — Le manège à roues représenté en coupe et en plan sur les figures 1 et 2, planche III, se compose d'une auge circulaire de 4 mètres de diamètre moyen, dans laquelle roulent deux ou trois meules verticales ou roues de 1^m,50 de diamètre environ, fixées à des distances inégales de l'axe de rotation du manège, afin de broyer successivement les matières répandues sur toute la largeur de l'auge.

La section transversale de l'auge est un trapèze dont la base inférieure a 0^m,65 et la base supérieure 0^m,75.

Dans l'intervalle des roues sont placés des raeloirs en fer *o* (fig. 3), ayant la forme de cette section transversale, et une sorte de soc de charrue *m* (fig. 4), qui ont pour but de mélanger les matières et de les replacer sans cesse sous le passage des roues.

Ces différentes pièces sont montées sur une charpente mobile autour d'un arbre vertical en bois, solidement fixé dans le sol. On soulage les traverses qui supportent le soc et les raeloirs, en les faisant reposer sur le bord de l'auge au moyen de galets *n* (fig. 5).

L'auge, construite en maçonnerie, a son fond recouvert de dalles en pierre dure. Autant que possible, pour faciliter le service, on établit le manège sur le bord d'une petite éminence. On peut alors construire en contre-bas une chambre dont le plafond est supporté par quelques madriers. Quand le mortier est suffisamment corroyé, on le fait tomber dans cette chambre, en ouvrant une trappe pratiquée dans le fond de l'auge.

Le manège peut être mis en mouvement, soit par un ou deux chevaux attelés au levier horizontal, soit par une machine à vapeur.

Pour confectionner le mortier avec ce manège, on commence par étendre dans l'auge la quantité de chaux nécessaire pour la manipulation d'une charge; on fait faire quelques tours de roues afin de bien la ramollir; puis, sans arrêter le manège, on répand peu à peu le sable qui doit être mélangé à la chaux. La pression des



roues fait monter sans cesse les matières contre les parois de l'auge; le racleur les ramène sur le fond et le soc les retourne.

Si, au lieu d'être en pâte, la chaux employée est en poudre, on l'étend dans l'auge sur une couche de 0^m,10 d'épaisseur et l'on verse dessus, au moyen d'un arrosoir, la quantité d'eau nécessaire pour la réduire en pâte ferme. On met ensuite le manège en mouvement et, dès que la chaux arrive à former une pâte homogène et d'une bonne consistance, on commence à répandre peu à peu le sable et on achève la trituration comme précédemment.

On peut également, avec la chaux en poudre, opérer, d'abord, à sec le mélange de la chaux et du sable, puis n'ajouter que pendant la trituration la quantité d'eau nécessaire à la manipulation du mortier.

La durée de la trituration ne doit pas être inférieure à 25 minutes; la charge de l'auge fournit 0^m,500 de mortier.

L'emploi du manège à roues permet de réaliser une économie de main-d'œuvre relativement à la manipulation du mortier à bras, mais il nécessite une installation un peu coûteuse.

Tonneau broyeur. — On substitue généralement aujourd'hui, au manège à roues, le tonneau broyeur imaginé par M. Bernard, inspecteur général des ponts et chaussées, et perfectionné par M. Roger, architecte.

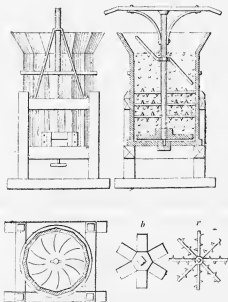


Fig. 26.

Cet appareil (fig. 26) consiste en un tonneau en chêne cerclé de fer, ayant environ 1 mètre de diamètre, placé debout sur l'un de ses fonds, ouvert et légèrement évasé à sa partie supérieure.

Une ouverture, pratiquée à la base de la paroi verticale et susceptible d'être fermée au moyen d'une porte à coulisse, sert pour l'écoulement du mortier confectionné. Sur les parois intérieures de ce tonneau sont fixées, à des hauteurs différentes, plusieurs couronnes en fonte dont les branches sont armées de dents en fer implantées verticalement. Le tonneau est traversé suivant son axe par un arbre auquel on peut imprimer un mouvement de rotation et sur lequel sont également montés un certain nombre de râtaux à plusieurs branches r dont les dents s'entrecroisent avec celles des couronnes fixes comme les dents de peignes étagés les uns au-dessus des autres.

Les matières introduites par le haut, en descendant à travers ces peignes, sont divisées et mélangées intimement. Le fond du tonneau est formé par un disque en fonte, dont la surface est sillonnée de stries courbes analogues à celles des meules de moulins à blé. En outre, à la partie inférieure de l'arbre vertical, est fixée une pièce b nommée broyeur, formée de plusieurs branches rayonnantes disposées en forme de socs et qui peut être plus ou moins rapprochée du fond au moyen d'une vis. Cette dernière disposition, introduite par M. Roger, a non seulement pour but d'effraser les ingrédients du mortier, mais encore de forcer celui-ci à s'échapper par l'ouverture inférieure et prévenir ainsi tout engorgement.

Pour confectionner le mortier avec cet appareil, on jette alternativement dans le tonneau la chaux en pâte molle et le sable dans les proportions prescrites. Si la chaux est en poudre, on commence par mélanger la chaux et le sable sur une aire en planches et dans les proportions déterminées, puis on jette le mélange peu à peu dans le tonneau, en y versant en même temps la quantité d'eau convenable.

On doit avoir soin, au début de l'opération, de tenir fermée la porte de décharge et de ne l'ouvrir qu'après la trituration complète de la couche inférieure. On peut ensuite, en ouvrant plus ou moins cette porte, régler l'écoulement du mortier de manière que les matières, à leur sortie, soient parfaitement broyées et mélangées.

Le tonneau broyeur peut être mis en mouvement, soit par des chevaux, soit par une machine à vapeur; il a l'avantage d'être portatif, d'exiger peu de place et de réaliser une économie notable sur le prix de revient, tout en donnant de très bons mortiers.

Les mortiers de chaux grasse peuvent être fabriqués à l'avance; ils ne peuvent, en effet, que gagner à être corroyés à plusieurs reprises. Il n'en est pas de même des mortiers de chaux hydraulique, qui ne doivent jamais être ramollis avec une addition d'eau; on doit donc éviter de préparer d'avance une quantité de mortier de chaux hydraulique supérieure à la consommation d'une journée.

DESSICCATION DES MORTIERS.

Les mortiers, amenés à bonne consistance, perdent une grande partie de leur cohésion lorsqu'ils sont exposés à une dessiccation très rapide. L'influence de la dessiccation a une importance d'autant plus grande que les chaux employées sont plus hydrauliques. Aussi, pendant les chaleurs, le sable qui est sec et brûlant doit être arrosé légèrement avant d'être mélangé à la chaux et on doit prendre certaines précautions pour ralentir la dessiccation. Si l'on construit avec des matériaux ab-

sorbants, avec la brique en particulier, il faut tenir ces matériaux dans un état complet d'imbibition jusqu'au moment de l'emploi, en les arrosant de temps en temps, s'il en est besoin. Le secret d'une bonne maçonnerie est contenu dans ce précepte de Vicat : *Mortier ferme et matériaux mouillés.*

Action de la gelée. — Tous les mortiers sont désagrégés par la gelée, lorsqu'ils sont encore frais; il faut donc avoir soin de les préserver contre un refroidissement trop considérable, soit en recouvrant les maçonneries de paillassons ou d'une couche de terre, soit en les abritant sous une toiture appropriée à leur étendue et à leur forme.

MORTIERS A BASE DE CHAUX ET DE POZZOLANES.

L'emploi des pouzzolanes dans la composition des mortiers permet d'obtenir d'excellents mortiers hydrauliques avec des chaux grasses ou faiblement hydrauliques.

On doit éviter de faire usage de pouzzolanes avec des chaux éminemment hydrauliques et donner la préférence à la chaux grasse sur la chaux hydraulique avec les pouzzolanes d'une grande énergie.

Dosages des matières. — D'après Vicat, la quantité de chaux grasse à mélanger à une pouzzolane doit être à peu près égale à 18 pour 100 du poids de la pouzzolane supposée pure et débarrassée des matières inertes telles que : sable, oxyde de fer, carbonate de chaux, etc.

Pour déterminer pratiquement la proportion de chaux grasse qui convient à une pouzzolane donnée, Vicat indique encore le procédé suivant : Il consiste à mélanger des quantités déterminées de chaux et de la pouzzolane à employer, de manière à former une boule de mortier, plutôt gras que maigre, de 0^m,02 de diamètre environ. Cette boule est placée pendant une année sous une eau pure fréquemment renouvelée. Au bout de ce temps, on recherche par l'analyse ou par un moyen quelconque, la quantité de chaux absorbée et en la retranchant de la quantité employée, on obtient le poids de chaux réellement combinée avec la pouzzolane, c'est-à-dire la proportion de chaux qui convient à la dose de pouzzolane employée.

Lorsqu'on fait usage de chaux hydraulique, il est à peu près impossible de fixer *a priori* le dosage qui dépend, dans ce cas, à la fois de l'hydraulicité de la chaux et de l'énergie de la pouzzolane. L'expérience a montré qu'il valait mieux pêcher par excès de chaux que par défaut, et, d'après Vicat, on doit admettre une dose de chaux hydraulique au moins double de la dose de chaux grasse qui serait nécessaire pour une quantité donnée de pouzzolane.

Une certaine proportion de sable, introduite dans le mélange de chaux hydraulique et de pouzzolane, améliore la qualité des mortiers; au contraire, quand on emploie la chaux grasse, toute addition de sable diminue la cohésion.

Le tableau ci-après donne la composition de quelques mortiers à base de chaux et de pouzzolanes adoptés par la pratique.

1° *Mortiers de pouzzolanes naturelles.*

| | | | |
|---|---|--|-----------|
| Mortiers de pouzzolane volcanique | { | Chaux grasse, éteinte par immersion, mesurée en poudre | 2 parties |
| | | Pouzzolane volcanique. | 5 — |
| | | <hr/> | |
| | | Chaux hydraulique, éteinte par immersion, en poudre. | 2 parties |
| | | Pouzzolane volcanique. | 4 — |
| | | Sable. | 4 — |
| <hr/> | | | |
| Mortiers de Trass | { | Chaux grasse, éteinte par immersion, en poudre. . . | 2 parties |
| | | Trass. | 4 — |
| | | <hr/> | |
| | | Chaux hydraulique mesurée vive et réduite en pâte. . | 4 parties |
| | | Trass. | 5 — |
| | | Sable. | 5 — |

2° *Mortiers de pouzzolanes artificielles.*

| | | | |
|---|-----|---|-----------|
| Mortiers d'argile cuite | { | Chaux hydraulique vive et réduite en poudre. | 1 partie |
| | | Pouzzolane d'argile cuite. | 1 — |
| | | Sable fin de rivière. | 1 — |
| <hr/> | | | |
| Mortiers de schiste, basalte ou grès argileux | { | Chaux ordinaire, éteinte par immersion, en poudre . | 2 parties |
| | | Schiste, ou basalte, ou grès argileux, calcinés, en poudre. | 5 — |
| | | <hr/> | |
| | | Chaux hydraulique, éteinte par immersion, en poudre. | 8 — |
| | | Schiste, ou basalte, ou grès argileux, calcinés en poudre. | 5 — |
| Sable. | 3 — | | |
| <hr/> | | | |
| Mortiers de cendrée | { | Chaux mesurée vive. | 5 parties |
| | | Cendrée de four à chaux, pure et passée au tamis. . | 2 — |
| | | <hr/> | |
| | | Chaux hydraulique, mesurée en pâte. | 5 parties |
| | | Cendrée. | 2 — |
| Sable. | 1 — | | |

Préparation et emploi des mortiers de pouzzolanes. — La cohésion des mortiers de pouzzolanes étant le résultat d'une combinaison, se trouve puissamment favorisée par la division physique des parties poussée aussi loin que possible et par un mélange intime des éléments qui les constituent. Il résulte de là : que la chaux éteinte par le procédé ordinaire serait préférable à la chaux en poudre ; que la pouzzolane, réduite en poudre impalpable, donne des mortiers très supérieurs à ceux que l'on obtiendrait avec la même pouzzolane en grains ; qu'enfin, le gâchage et la trituration des matières ont une importance capitale sur la solidité ultérieure

des mortiers. Cette opération peut, d'ailleurs, s'effectuer, soit à bras, soit avec les tonneaux broyeur, comme pour la préparation des mortiers ordinaires.

Les mortiers de pouzzolane ne conviennent que pour l'exécution des maçonneries constamment immergées ou humides. Employés à l'air libre et sec, ils restent friables, pulvérulents et sujets à la gelée, à moins d'une forte addition de sable qui, sans les empêcher de devenir pulvérulents, les protège, au moins, contre les fendillements que tend à produire le retrait.

MORTIERS DE CIMENT.

Les eiments s'emploient rarement purs. Lorsqu'on veut transformer les eiments en mortiers, on y ajoute généralement une certaine proportion de sable dont la présence s'oppose à la production des gerçures ainsi qu'aux effets destructeurs des gelées.

Cette introduction du sable, dont la proportion doit, d'ailleurs, varier avec l'espèce du eiment et la nature du travail à exécuter, a l'inconvénient de diminuer notablement la cohésion, parce que le ciment adhère mal au sable et qu'on est, en outre, forcé d'ajouter une plus grande quantité d'eau pour le gâchage.

Les essais faits par M. Vaudrey sur des mortiers composés de ciment de Vassy ou des Moulineaux et de proportions variables de sable de Seine, ont donné les résultats suivants :

| Proportion de sable pour 1 volume de ciment. | Poids du ciment par mètre cube de mortier. | Résistance à la traction par centimètre carré. |
|--|--|--|
| 0..... | 1100 ^k | 10 ^k |
| 1..... | 660 | 10 |
| 2..... | 446 | 8 |
| 3..... | 335 | 6,5 |
| 4..... | 275 | 5,6 |
| 5..... | 220 | 4,7 |
| 6..... | 185 | 4 |
| 7..... | 157 | 5 |
| 8..... | 139 | 2,5 |
| 9..... | 122 | 1,8 |
| 10..... | 110 | » |

Ces chiffres montrent que le mortier formé d'une partie de sable contre une partie de ciment est aussi solide que la pâte de ciment pur, mais que la résistance du mortier diminue ensuite rapidement, quand on augmente la dose de sable et qu'enfin un mélange de 10 parties de sable contre 1 de ciment n'acquiert aucune consistance.

Le dosage des matières se fait en mesurant le ciment et le sable sans tassement.

Les proportions de ciment et de sable les plus convenables à adopter, pour chaque nature de travail, doivent être déterminées par des expériences, et dépendent des vides du sable employé.

Pour le rendement en mortier, on admet que, lorsque la proportion de ciment est inférieure à 2 volumes de ciment pour 5 de sable, 1 mètre cube de mortier correspond à 1 mètre cube de sable; et que, lorsque cette proportion est plus grande, 1 volume de mortier est produit par des volumes de sable et de ciment en poudre correspondant à un volume total de 1^m,40. Enfin, 1 mètre cube de mortier de ciment pur est produit par 1^m,25 du ciment en poudre.

PRÉPARATION DES MORTIERS DE CIMENT A PRISE RAPIDE.

La préparation et la mise en œuvre des mortiers de ciment romain exige des ouvriers expérimentés, à cause de la rapidité de la prise.

Le gâchage est une opération qui exerce une très grande influence sur la qualité du mortier, il s'exécute dans une auge portative à fond rectangulaire dont l'une des parois latérales est supprimée, et à l'aide d'une truelle à long manche coupée carrément par le bout. Le ciment et le sable sont dosés dans des sébiles puis étendus dans l'auge, où ils sont mélangés à sec. Le mélange est ensuite rassemblé sur le côté ouvert de l'auge, en forme de digue, pour retenir l'eau nécessaire au gâchage, que l'on verse, autant que possible, en une seule fois. On pousse alors, rapidement et par petites parties, toute la digue sur l'eau qui ne tarde pas à être absorbée, puis on agite le tout avec la truelle pour en former un mélange préparatoire que l'on fait passer à trois ou quatre reprises sous le plat de la truelle.

Le gâchage du ciment doit se faire par le travail du poignet et non à force d'eau. La quantité d'eau à employer doit être au plus égale à la moitié du volume du ciment. Le mélange du ciment avec le sable, qui a d'abord la consistance d'une pâte ferme, se ramollit par la trituration. Lorsque le mortier est convenablement gâché, il est mou et homogène; son aspect est luisant et légèrement huileux quand on le relève en tas avec la truelle.

On ne prépare pas, à la fois, plus de 6 litres de mortier par gâchée, et on doit l'employer dans les dix minutes qui suivent sa préparation.

Le mortier de ciment pur est à peu près exclusivement employé à l'étanchement des fuites d'eau et des sources, à cause de sa solidification presque instantanée et de sa grande imperméabilité.

Les mortiers, dans lesquels la dose de sable est au plus égale au volume du ciment, conviennent spécialement pour les enduits de réservoirs, de citernes. Les mortiers qui contiennent 1,5; 2; 2,5 de sable pour 1 volume de ciment sont les plus employés, soit pour hourder, soit pour rejointoyer des maçonneries.

On adopte quelquefois les proportions de 3 et 3,5 de sable pour 1 de ciment dans la construction des maçonneries de murs, voûtes ou massifs qui doivent arriver à un durcissement suffisant avant d'être soumis à de fortes charges.

Quant aux mortiers qui contiennent 4, 4,5 et 5 volumes de sable pour 1 de ciment, ils constituent des mortiers maigres qui durcissent encore assez rapidement sous l'eau, mais qui laissent à désirer sous le rapport de l'adhérence et de l'imperméabilité.

PRÉPARATION DES MORTIERS DE CIMENT A PRISE LENTE.

Les mortiers de ciment à prise lente sont d'une manipulation beaucoup plus facile et acquièrent une solidité plus grande que les mortiers de ciment romain ; ils sont devenus, en raison de ces propriétés, d'un emploi très fréquent, non seulement pour l'exécution d'importants travaux de maçonnerie, mais encore pour la confection des dallages.

Ces mortiers peuvent être préparés en grandes masses et par les mêmes procédés que les mortiers de chaux. Le point important est d'obtenir une bonne trituration et une bonne massivation des matières, en évitant de les diviser par l'addition d'une trop grande quantité d'eau. Sous ce rapport, la manipulation avec le rabot ou les pilons est préférable à la trituration dans les tonneaux broyeurs.

La pâte de ciment de Portland n'est ni grasse, ni collante, comme la pâte de chaux. Il en résulte que les grains de sable mélangés à la pâte de ciment peuvent glisser plus facilement et acquérir un degré de tassement qui se rapproche de celui du sable saturé d'eau. Il faut donc souvent plus d'un mètre cube de sable sec et non tassé pour produire un mètre cube de mortier. Ce tassement est d'ailleurs d'autant plus accentué que les mortiers ont été manipulés plus longtemps.

Le tableau suivant donne les dosages adoptés pour les mortiers de ciment de Portland, suivant le genre de travaux auxquels on les destine ; il fait connaître, dans chaque cas, les quantités d'eau nécessaires pour le gâchage ainsi que les rendements correspondants en mortier.

| N° | NATURE DES MORTIERS et des travaux auxquels on les destine. | Dosage en volume. | | Quantité d'eau néces- saire pour le gâchage. | Volume du mortier obtenu. | | Dosage par mètre cube de mortier non tassé. | |
|----|---|-------------------|--------|--|---------------------------------|-------------------|---|------------------------|
| | | Portland. | Sable. | | Non tassé. | Tassé à refus. | Poids du Portland. | Volume du sable. |
| 1 | Mortier de Portland pur .. | 1 | 0 | 0,570 | " | 0,800 | 1600 ^k | " |
| 2 | Mortier très gras pour en- duits verticaux, chapes, rejointoiements | 1 | 1 | 0,400 | 1,580 | 1,550 | 855 | 0,660 |
| 3 | Mortiers ordinaires pour chapes de trottoirs et en- duits de toutes sortes, | 1/2 | 1 | 0,275 | 1,580 | 1,110 | 490 | 0,750 |
| 4 | bassins..... | 1/3 | 1 | 0,200 | 1,265 | 1,055 | 355 | 0,800 |
| 5 | Mortiers ordinaires pour | 1/4 | 1 | 0,170 | 1,100 | 0,950 | 305 | 0,910 |
| 6 | grosse maçonnerie étan- | 1/3 | 1 | 0,142 | 1,055 | 0,950 | 255 | 0,950 |
| 7 | che, bétons..... | 1/6 | 1 | 0,150 | 1,055 | 0,950 | 215 | 0,950 |
| 8 | | 1/7 | 1 | 0,150 | 1,055 | 0,950 | 185 | 0,950 |
| 9 | Mortiers maigres pour mou- | 1/8 | 1 | 0,125 | 1,055 | 0,950 | 160 | 0,950 |
| 10 | lages, voûtes..... | 1/9 | 1 | 0,125 | 1,055 | 0,950 | 140 | 0,950 |
| 11 | | 1/10 | 1 | 0,110 | 1,055 | 0,950 | 127 | 0,950 |

Les résultats consignés dans ce tableau ont été obtenus avec du ciment de Frangey

pesant 1350 kilogrammes par mètre cube. Le sable, employé pour les mortiers 2 et 5, était du sable de rivière passé au crible fin, et pour tous les autres, du sable moyen.

Nous rappelons que les ciments lourds étant généralement supérieurs aux ciments légers, il convient d'indiquer les dosages des mortiers de ciment de Portland en poids de ciment et volume de sable.

Le ciment de Portland mélangé au sable, à dose beaucoup plus faible que le ciment romain, peut donner des mortiers aussi résistants, ce qui permet de réaliser de notables économies dans l'emploi. D'après Darcel, un mortier composé de 1^m de sable et de 365 kilogrammes de ciment de Portland est aussi résistant qu'un mortier composé du meilleur ciment romain, gâché avec un égal volume de sable, et qui contiendrait ainsi 660 kilogrammes de ciment par mètre cube de mortier.

Le ciment jouit aussi de la propriété de rejeter une grande partie de l'eau qui lui est ajoutée en excès, lorsqu'il est employé en coulis ou en injection. Quel que soit son degré de fluidité, il finit toujours par former une masse résistante en tous ses points; tandis qu'avec les ciments romains, qui sont d'ailleurs difficiles à employer à l'état fluide, la partie inférieure du dépôt qui se forme reste à l'état inerte et n'acquiert qu'une résistance très médiocre. Cette propriété du ciment de Portland permet de remplir, avec une grande facilité, les joints laissés entre les pierres de taille et d'éviter tous les vides dans les massifs. Il faut cependant, autant que possible, éviter un excès d'eau qui nuit toujours à la qualité du mortier.

MORTIER DE CHAUX ET DE CIMENT.

Le mortier de chaux et de ciment que l'on désigne aussi sous le nom de *mortier bâlard*, de même que le mortier de chaux et de plâtre, est le résultat du mélange d'une certaine quantité de ciment avec un mortier de chaux ordinaire. Cette addition de ciment au mortier de chaux a pour effet d'augmenter sa résistance et de hâter sa solidification. On obtient un mortier très hydraulique, qui convient très bien pour l'exécution de fondations, en ajoutant à un mortier de chaux grasse 1/10 à 1/5 de son volume de ciment en poudre.

Le mortier de chaux doit être préalablement préparé et amené à une consistance un peu claire, on y ajoute peu à peu la dose de ciment en poudre que l'on mélange avec soin, soit au rabot, soit avec les appareils spéciaux qui ont servi à fabriquer le mortier ordinaire. On doit éviter, dans la composition de ces mortiers, l'emploi de ciment romain, qui, faisant prise avant que la chaux ait commencé à se dessécher, les expose à une prompte désagrégation.

Les ciments complètement éventés et qui, employés isolément, ne pourraient faire prise, sont susceptibles de former d'excellents produits hydrauliques, lorsqu'ils sont mélangés avec la chaux grasse. Dans ce cas, le ciment joue le rôle d'une pouzzolane; il faut lui ajouter 10 à 50 pour 100 de chaux caustique, suivant la rapidité de prise que l'on veut obtenir sous l'eau.

DES MORTIERS ANTIQUES COMPARÉS AUX MORTIERS DU MOYEN AGE ET AUX MORTIERS MODERNES.

Vicat, dans son *Traité théorique et pratique de la composition des mortiers et ciments*, exprime, comme il suit, son avis sur les mortiers antiques comparés aux mortiers du moyen âge et aux mortiers modernes.

Les monuments de l'Égypte présentent les exemples les plus anciens que l'on puisse citer de l'emploi de la chaux dans les constructions ; le mortier qui lie les pierres des Pyramides, et notamment celles de Chéops, est exactement semblable à nos mortiers d'Europe ; celui que l'on aperçoit entre les joints dégradés, à Ombos, à Edfou, dans l'île de Philæ, et en d'autres lieux, décèle, par sa couleur et son grain, la présence d'un sable rougeâtre très fin, mêlé avec la chaux dans les proportions ordinaires. L'usage du mortier était donc déjà connu plus de deux mille ans avant notre ère.

Mais, tandis qu'en Égypte l'emploi du mortier est limité au remplissage des joints très minces qui séparent les blocs énormes dont se composent les monuments, en Grèce, l'industrie, stimulée par les exigences d'un climat tout différent, parvint à varier l'emploi de la chaux et à l'étendre à une foule d'usages inconnus à l'Égypte. Dans la suite, les colonies grecques importèrent et popularisèrent leurs procédés en Italie ; les architectes romains purent s'instruire, d'ailleurs, dans les écrits que les auteurs grecs avaient publiés sur l'art de bâtir. Ces écrits ne sont pas parvenus jusqu'à nous ; mais Vitruve, qui cite les noms de leurs auteurs, a dû y puiser tout ce qu'il nous a transmis. Or il est impossible de trouver dans l'ouvrage de Vitruve rien qui puisse faire croire à des procédés particuliers dont le secret se serait perdu. Tout ce qui a trait à la chaux, au sable et à la pouzzolane y est clairement exposé.

D'après Vitruve, les constructeurs romains regardaient comme chaux par excellence celle qui provient du marbre le plus pur et le plus dur, c'est-à-dire la chaux la plus grasse possible. La chaux hydraulique et le produit moderne que nous appelons ciment leur étaient totalement inconnus ; aussi ne pouvaient-ils se passer de pouzzolanes dans leurs travaux hydrauliques, tels que môles à la mer, aqueducs, citernes, etc. Hors de l'Italie, dans les Gaules, par exemple, ils remplaçaient la pouzzolane du Vésuve, d'un transport trop dispendieux, par la brique ou la tuile pilées.

Les mortiers romains se ressemblent généralement ; on les reconnaît à la présence d'un gros sable mêlé de gravier ; les grumeaux de chaux y sont quelquefois tellement multipliés, qu'il est impossible d'attribuer leur présence à un défaut de broyage ; l'extinction incomplète de la chaux grasse, par aspersion ou immersion, peut seule en rendre raison. Ceux de ces mortiers que l'on destinait aux lieux humides, aux citernes, aux rigoles et aux carrelages, se composaient ordinairement de fragments de briques concassées, depuis la grosseur d'une petite noix jusqu'à celle du gravier, enchâssés dans une gangue de chaux grasse ; cette espèce de béton

ne pouvait faire corps que par une dessiccation aidée d'une massivation soignée et très laborieuse ; on dérasait ensuite les surfaces pour les polir et y passer une couche de peinture, destinée, probablement, à empêcher la dissolution de la chaux au contact de l'eau.

L'excellence attribuée indistinctement à tous les mortiers romains et, par suite, la supposition d'un procédé particulier de fabrication, dont le secret se serait perdu, sont autant d'exagérations et d'erreurs faciles à réfuter. Les procédés usuels ont dû se transmettre de père en fils à travers les siècles, et cela est si vrai qu'aujourd'hui encore, les maçons italiens confectionnent les enduits et les carrelages en béton, comme on les retrouve dans les ruines antiques. Il est, d'autre part, inexact que les mortiers romains aient été partout et toujours également bons ; s'il en eût été ainsi, le temps seul n'eût point effacé tant de constructions et de monuments dont on retrouve à peine aujourd'hui des traces informes. Comme, d'ailleurs, on trouve fréquemment dans les constructions datant du moyen âge, de vieux remparts, de vieux châteaux, qui exigent, pour leur démolition, l'emploi de la poudre, on serait amené à conclure que le secret des Romains était encore connu à cette époque et ne se serait perdu que plus tard précisément à la Renaissance, supposition qui n'est pas admissible.

Il faut donc reconnaître, avec Vitruve, que les Romains employaient la chaux, le sable et les matériaux mêmes du pays où ils bâtissaient comme nous le faisons aujourd'hui ; ajoutons que l'analyse chimique de leurs mortiers n'y a fait découvrir aucun principe qui ne soit dans les nôtres, mais que, par l'action séculaire de l'acide carbonique, et dans certains cas, par l'accession de principes capables d'attaquer le sable et d'en rendre la silice susceptible de se combiner à la chaux, ces mortiers ont pu arriver à un très haut degré de dureté, comme aussi rester très médiocres, quand les conditions où ils se trouvaient placés leur ont été moins favorables.

Le véritable progrès réalisé de nos jours, c'est d'obtenir, après quelques mois, avec les mortiers à chaux éminemment hydrauliques, et après quelques jours, avec certains ciments, des maçonneries pouvant égaler en solidité les meilleures maçonneries antiques.

On trouvera, dans le tableau suivant, l'analyse, d'après M. W. Wallace, de quelques mortiers antiques.

| PROVENANCE DES MORTIERS. | Silice lin. et sable fin. | Alumine. | Chaux. | Sable grossier. | Petites pierres. | Peroxyde de fer. | Magnésie. | Acide sulfurique. | Acide carbonique | Potasse. | Soude. | Matières organiques. | Eau. | Totaux. |
|--|------------------------------|----------|--------|-----------------|------------------|------------------|-----------|-------------------|------------------|----------------|--------|----------------------|------|---------|
| <i>1° Mortiers phéniciens.</i> | | | | | | | | | | | | | | |
| Ruines d'un temple à Larnea (île de Chypre)..... | 16,20 | 2,16 | 26,40 | 5,57 | 28,65 | 0,99 | 0,97 | 0,21 | 20,25 | » | » | 0,56 | 0,54 | 100,25 |
| Formant joint des conduites d'eau enfouies à Larnea | 0,96 | 0,40 | 51,58 | » | » | » | 0,70 | 0,82 | 40,60 | » | » | 0,24 | 5,09 | 58,59 |
| <i>2° Mortiers grecs.</i> | | | | | | | | | | | | | | |
| Mortier exposé à l'air, pris au Pnyx, à Athènes..... | 42,06 | 2,64 | 45,70 | » | » | 0,92 | 1 | » | 57 | » | » | » | 0,56 | 99,68 |
| Pris à l'intérieur d'un temple, à Athènes..... | 5,90 | 0,98 | 49,65 | » | » | 0,82 | 4,09 | 4,04 | 58,55 | » | » | » | 5,07 | 98,88 |
| <i>3° Mortiers romains.</i> | | | | | | | | | | | | | | |
| Villa Adrien, à Tivoli | 61,10 | 44,70 | 45,50 | » | » | 4,92 | 0,50 | » | 44,80 | 4,01 | 2,42 | 2,28 | 5,20 | 98,73 |
| Revêtement mural à Ilerculanum, exposé au contact de la lave élaude..... | 55,56 | 2,86 | 29,88 | » | » | 2,52 | 0,25 | » | 25,80 | 5,40 | 5,49 | 1,50 | 1 | 101,86 |
| Toit des tombes latines, à Rome | 56,26 | 16,59 | 49,71 | » | » | 4,25 | 0,71 | » | 45,61 | Non déterminé. | » | » | 8,20 | » |
| Mosaïque du sol des bains de Caracalla, à Rome..... | 50,24 | 40,64 | 25,49 | » | » | 5,97 | 0,90 | » | 47,97 | 1d. | » | 2,48 | 5,50 | » |

D'après les chiffres de ce tableau, l'acide carbonique, dosé dans les six premiers mortiers analysés, correspond très sensiblement à la neutralisation complète de la chaux et de la magnésie. Dans les deux derniers seulement, la proportion d'acide carbonique n'est pas tout à fait suffisante pour saturer la chaux et la magnésie, soit qu'il existât encore de la chaux caustique, soit qu'une portion de la chaux fût entrée en combinaison avec la silice de l'alumine.

DE LA SOLIDIFICATION ET DES CAUSES D'ALTÉRATION DES MORTIERS

1^{er} MORTIERS DE CHAUX GRASSES.

Les mortiers de chaux grasses, exposés à l'air, font prise quelques jours après l'emploi, c'est-à-dire qu'au bout de ce temps ils sont en état de résister à la pression des doigts, tout en étant cependant encore assez tendre pour se laisser rayer par l'ongle. Leur durcissement ne s'accomplit que graduellement, souvent avec une extrême lenteur, et l'on trouve des exemples de mortiers qui, après plusieurs siècles, ne sont pas encore arrivés à leur durcissement complet.

Causes du durcissement. — La prise et le durcissement des mortiers de chaux grasse sont dus, d'une part, à la dessiccation de l'hydrate de chaux et, d'autre part, à l'absorption de l'acide carbonique et à la transformation de l'hydrate en carbonate de chaux.

Dès qu'un mortier frais est exposé à l'air, il commence par perdre une partie de son eau, et c'est ce commencement de dessiccation qui détermine la prise. L'absorption de l'acide carbonique est insignifiante à l'origine, elle ne se produit réellement qu'après la prise et contribue au durcissement en se propageant lentement de la surface vers l'intérieur de la masse.

Il est, d'ailleurs, à remarquer que la combinaison de la chaux avec l'acide carbonique a une certaine corrélation avec la marche de la dessiccation. La présence d'une trop forte proportion d'eau, comme celle qui existe dans le mortier frais (50 pour 100 environ), de même qu'une dessiccation trop avancée, ont également pour effet de retarder l'absorption de l'acide carbonique. En plaçant, par exemple, du mortier frais dans un tube de verre et en le soumettant à l'action d'un courant d'acide carbonique, on a constaté qu'au bout de plusieurs jours ce mortier n'avait subi aucune modification; il était resté à l'état de pâte humide et n'avait absorbé qu'une quantité de gaz insignifiante, tandis que des échantillons du même mortier, qui avaient été exposés à l'air, pendant le même temps, avaient durci et s'étaient assimilés une quantité d'acide carbonique beaucoup plus considérable.

Une autre expérience met en évidence l'influence de l'eau à dose restreinte : Si l'on suspend dans un flacon rempli d'acide carbonique des échantillons de mortier frais, au bout de huit jours, on constate qu'ils sont aussi mous qu'au commencement et qu'ils n'ont absorbé qu'une quantité d'acide carbonique inférieure à 1 pour

100 de leur poids. Mais si l'on vient à placer au fond du flacon une couche d'acide sulfurique, de manière à favoriser la dessiccation du mortier, l'acide carbonique se trouve rapidement absorbé (14 pour 100 en un jour). Il en est de même si, dans le flacon simplement rempli d'acide carbonique, on introduit du mortier ne renfermant qu'une faible proportion d'eau, par exemple, du mortier qui a déjà fait prise à l'air ou qui a été en contact avec une matière absorbante, comme la brique; ou encore, du mortier auquel on a ajouté une certaine quantité de chaux non éteinte, à l'état de poudre.

Le mortier se comporte absolument de la même manière en présence d'une dissolution de carbonate d'ammoniaque; si on l'arrose, à l'état frais, avec cette dissolution, il reste pâteux et n'absorbe qu'une faible quantité d'acide carbonique; cette absorption est, au contraire, très considérable et le mortier devient très dur, si l'arrosage est fait après la prise.

D'un autre côté, lorsque l'on dessèche complètement le mortier, on obtient une masse compacte, mais très friable. A cet état, le mortier n'absorbe point l'acide carbonique et ne durcit pas.

Il résulte de ces faits que l'absorption de l'acide carbonique par le mortier est intimement liée à la présence d'une certaine proportion d'eau.

Une dessiccation lente du mortier, après la prise, a donc pour effet de favoriser la transformation de l'hydrate en carbonate; elle a également pour résultat d'augmenter la cohésion que prend l'hydrate, puisque pendant le durcissement les parties qui se solidifient les premières sont imbibées d'une dissolution de chaux qui, en s'évaporant peu à peu, dépose la chaux qu'elle contient à la manière des liquides incrustants et donne à la liaison de ces parties une solidité d'autant plus grande que le dépôt s'est effectué plus lentement. On peut expliquer par là la grande dureté de certains mortiers de chaux grasse trouvés dans la démolition de quelques massifs de fondation datant du moyen âge et qui ont nécessité, pour leur destruction, l'emploi de la poudre.

La rapidité d'absorption de l'acide carbonique peut être, en outre, singulièrement modifiée par la nature des surfaces qui terminent les blocs de chaux ou de mortier. En particulier, le lissage des surfaces met obstacle à la pénétration de l'acide carbonique.

La figure ci-contre indique par des hachures la surface des bandes carbonatées, relevées par Vicat, sur la section d'un fragment d'hydrate de chaux âgé d'un an, et met en évidence l'influence des surfaces.

La partie *cd* était en contact avec un madrier; le parement *bc* avait été lissé à la truelle, la face *ab* était rude et la partie *ad* avait été fracturée.

Le mélange du sable à la chaux n'est point une condition essentielle du durcissement; mais il est certain que le sable exerce une action fort utile, en rendant la masse plus poreuse et en facilitant l'accès de l'acide carbonique. Le sable a,

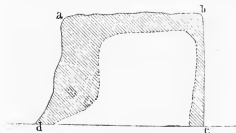


Fig. 27.

en outre, pour résultat, comme nous l'avons déjà indiqué, de combattre les effets du retrait et de diminuer notablement le prix de revient du mortier.

Bien que la chaux paraisse être sans action sur le sable, l'analyse accuse cependant la présence de silice combinée à la chaux, en quantité plus ou moins grande, dans presque tous les mortiers datant de plusieurs siècles et confectionnés avec des chaux grasses. Petzholdt a trouvé 2,4 pour 100 de silice combinée dans un mortier de cent ans et 6,2 pour 100 dans du mortier de trois cents ans, alors que la chaux, qui avait été utilisée pour fabriquer ces deux mortiers, n'en contenait que 0,44 pour 100. Il semble résulter de ces chiffres que l'attaque du sable quartzueux par la chaux caustique se fait avec une extrême lenteur. Petzholdt l'a, d'ailleurs, démontré par les expériences directes suivantes : Prenant une chaux provenant de la calcination du marbre de Carrare et qui, par conséquent, se trouvait complètement exempte de silice soluble dans les acides, il l'a mélangée isolément d'abord avec de la silice, préparée artificiellement et calcinée, puis avec de la poudre de quartz lavée, enfin avec du sable blanc, et a obtenu les résultats suivants :

| | TAUX POUR 100 DE SILICE SOLUBLE | |
|---|---------------------------------|-------------------|
| | Après une semaine. | Après 5 semaines. |
| Mélange de chaux grasse et de silice calcinée | 0,59 | 4,40 |
| — — et de poudre de quartz.... | 0,04 | 0,60 |
| — — et de sable blanc..... | 0,06 | 0,66 |

Si l'on prélève des échantillons de mortier de chaux grasse en différents points d'un même massif de maçonnerie, la comparaison entre les proportions d'acide carbonique et de silice soluble montre que la silice se trouve toujours en plus forte proportion dans les parties où l'acide carbonique n'a pas pénétré. Au contraire, dans les parties voisines de la surface, l'acide carbonique seul est absorbé et arrive même à déplacer la silice, qui primitivement était combinée à la chaux.

La formation du silicate de chaux, qui résulte de l'action chimique de la chaux sur le sable, ne peut que contribuer au durcissement du mortier ; mais cette cause de durcissement est tout à fait accessoire, car on peut obtenir des mortiers d'une grande dureté, en remplaçant le sable quartzueux par du calcaire ou de la craie broyés et réduits en poudre.

CAUSES D'ALTÉRATION.

Un mortier de chaux grasse est détruit par la seule action de l'eau qui dissout l'hydrate de chaux. Cette action destructive est favorisée par le renouvellement de l'eau qui vient en contact avec le mortier.

Il peut, au contraire, résister à l'action de l'humidité et même acquérir une grande dureté dans une eau stagnante, si la carbonatation des parties superficielles a pu se produire avant l'immersion.

Les matières azotées telles que l'urine, les fumiers, peuvent, dans certaines conditions de température et d'humidité, donner naissance, en présence de la chaux des mortiers, à des nitrates (nitrate de chaux, nitrates alcalins, etc.) qui se déposent sur les points des maçonneries où l'évaporation se fait dans les conditions les plus favorables. Ces sels apparaissent, soit sous la forme de concrétions d'un blanc de neige, dans la couche superficielle de l'enduit, soit à la surface elle-même, sous la forme d'efflorescences légères, qui ressemblent à des flocons de neige. Ces dépôts peuvent être recueillis pour servir à la préparation du salpêtre du commerce ; mais leur production correspond à une altération profonde des maçonneries sur lesquelles ils apparaissent, altération qu'on désigne souvent sous le nom de *carie des murs*.

Il se produit également très souvent, à la surface des murs, des efflorescences d'une autre nature et qui se composent de sulfate de soude, de carbonate de soude, de chlorure de sodium, de carbonate de potasse et de chlorure de potassium. Elles apparaissent aussi bien sur les maçonneries en grès que sur celles en briques et quel que soit le sable employé. Elles ne proviennent, par conséquent, ni des pierres, ni du sable et doivent être attribuées à la nature des chaux qui ont servi à la confection du mortier.

La présence des alcalis dans les chaux s'explique d'ailleurs facilement, soit que ces alcalis préexistent dans le calcaire soumis à la calcination, soit qu'ils résultent du mélange des cendres du combustible avec la pierre à chaux, pendant la cuisson dans les fours.

Il convient, d'ailleurs, d'ajouter que, dans un grand nombre de cas, les sels alcalins solubles, contenus dans le sol, montent dans les murs avec l'humidité et viennent cristalliser ensuite à leur surface par suite de l'évaporation.

Dans les manufactures de tabac, les cheminées qui servent à l'évacuation des gaz de la torréfaction fournissent un cas particulier d'altération des mortiers, caractérisé par la disparition complète de la chaux dans les parties voisines du sommet de la cheminée. Cette altération s'explique par la solubilité du carbonate de chaux dans l'eau chargée de sels ammoniacaux. Le sulfate d'ammoniaque, dont l'analyse a dénoté la présence, résulte ici de la réaction des vapeurs qui se dégagent du tabac, sur l'acide sulfureux provenant de la combustion du coke employé dans les fours des torréfacteurs. Le sulfate de nicotine qui se forme également ajoute son action à celle du sulfate d'ammoniaque ; enfin, l'eau nécessaire à l'entraînement de la chaux est fournie par la condensation de la vapeur d'eau dont sont chargés les gaz, condensation qui ne peut se produire qu'à la partie supérieure de la cheminée.

Enfin, l'emploi d'eau saumâtre pour l'extinction de la chaux ou le gâchage du mortier donne lieu à la formation de carbonate de soude et de chlorure de calcium. Ces sels, en raison de leur grande déliquescence, ont pour effet de maintenir les maçonneries et les parements des murs dans un état constant d'humidité.

2° MORTIERS HYDRAULIQUES.

Sous cette dénomination se trouvent compris tous les mortiers qui font prise plus ou moins rapidement sous l'eau, ainsi que dans les lieux humides. Ces mortiers peuvent se diviser en 3 classes principales :

1° Les mortiers hydrauliques ordinaires, fournis par le mélange de chaux hydraulique et de sable;

2° Les mortiers composés de chaux grasse ou hydraulique et de pouzzolanes, avec ou sans addition de sable;

5° Les mortiers de ciments à prise lente ou rapide, avec ou sans addition de sable.

L'ingénieur anglais J. Smeaton fut le premier qui signala les propriétés hydrauliques de certaines chaux. Chargé de la reconstruction du phare d'Eddystone, il constata que le produit de la calcination de calcaires contenant de l'argile « acquérait une propriété qui avait pour effet de donner de la solidité aux murs construits dans l'eau et de rendre les murs exposés à l'air plus résistants que s'ils avaient été construits avec une chaux exempte d'argile. »

Cette observation fut le point de départ d'un grand nombre de recherches ayant pour but de déterminer le rôle des différents éléments dont se composent les mortiers hydrauliques dans le phénomène de la solidification, ainsi que les causes d'altération de ces mortiers par l'eau de mer.

Il convient notamment de citer les importants travaux de Vicat, de Berthier, de MM. Rivot et Chatoney, les travaux plus récents de M. Fremy et, en dernier lieu, ceux de M. Le Chatelier et de M. Landrin.

Des recherches de cette nature sont extrêmement délicates, car pour apprécier les causes qui influent sur la solidité et la décomposition des mortiers hydrauliques, il faudrait pouvoir déterminer, d'une manière irréfutable, leur véritable constitution.

C'est sur ce point important que les savants éminents, qui se sont livrés à l'étude de la question, ont exprimé des opinions différentes. Leurs travaux n'en ont pas moins une très grande valeur scientifique et nous croyons utile d'en faire ici un résumé.

TRAVAUX DE MM. VICAT ET BERTHIER.

RÉACTIONS QUI DÉTERMINENT LA PRISE DES CHAUX HYDRAULIQUES.

MM. Vicat et Berthier ont établi que l'état de la silice contenue dans un calcaire exerce une grande influence sur les propriétés de la chaux que ce calcaire peut produire. En effet, la silice en gelée, calcinée avec du carbonate de chaux, donne une chaux hydraulique de bonne qualité. Le quartz, au contraire, réduit en poudre et calciné avec du carbonate de chaux, produit une chaux maigre qui n'est nullement hydraulique. La silice, telle qu'elle se trouve dans l'argile, est dans un état favorable à la production des chaux hydrauliques.

La silice hydratée et surtout l'argile desséchée à 500 ou 400° enlèvent complètement la chaux tenue en dissolution dans l'eau.

Les meilleures chaux hydrauliques contiennent de la silice, de la chaux, de la magnésie ou de l'alumine et proviennent de la calcination des calcaires argileux.

La présence d'une certaine quantité d'oxyde de fer ou d'oxyde de manganèse paraît nuire aux propriétés de la chaux.

Par la calcination, la chaux, ramenée à l'état caustique, réagit sur l'argile en s'emparant de la silice pour former un silicate de chaux, tandis que l'alumine et le restant de la silice constituent un silicate d'alumine.

La chaux cuite est donc un mélange de ces deux silicates avec de la chaux vive en grand excès. Lorsque l'eau intervient, les trois substances s'hydratent, s'unissent intimement : la chaux devient par cela même complètement insoluble dans l'eau.

La solidification d'une chaux hydraulique doit être attribuée à la formation d'un silicate d'alumine et de chaux ou de magnésie et de chaux, qui se combine avec l'eau et produit un hydrate excessivement dur et insoluble dans l'eau. Le durcissement de la chaux hydraulique peut donc être comparé à celui du plâtre cuit, qui se combine aussi avec l'eau pour former un hydrate solide.

RECHERCHES DE M. VICAT SUR LES CAUSES CHIMIQUES DE LA DESTRUCTION DES COMPOSÉS HYDRAULIQUES PAR L'EAU DE MER.

A la suite de graves accidents survenus dans des travaux exécutés à la mer, M. Vicat s'est proposé : 1° de déterminer les causes chimiques de l'action destructive de l'eau de mer sur les différents matériaux hydrauliques : mortiers de chaux, ciments, gangues à pouzzolanes et chaux grasse ; 2° de trouver les moyens d'apprécier leur résistance à cette action. Il a entrepris, à cet effet, une série de recherches pour établir le rôle des différents éléments de l'eau de mer sur les parties constituantes de ces matériaux.

1° MORTIERS DE CHAUX HYDRAULIQUE.

Rôle de l'acide carbonique. — D'après les analyses de John de Berlin, les quantités d'acide carbonique trouvées dans des mortiers ayant depuis 100 jusqu'à 1800 ans d'âge, sont comprises entre les $\frac{5}{5}$ et les $\frac{4}{5}$ des quantités nécessaires à la saturation de la chaux. Ces mortiers pouvaient être présumés à chaux grasse par la faible quantité de silice et d'alumine solubles qu'ils contenaient.

Dans d'autres mortiers réputés hydrauliques, qui avaient séjourné dans l'eau ou sous une terre humide, ce même chimiste n'a trouvé parfois que le $\frac{1}{5}$ de la quantité d'acide carbonique nécessaire pour la formation du carbonate neutre. Il convient d'ajouter que ces mortiers contenaient une quantité assez notable de silice soluble qui, par conséquent, était combinée à une partie de la chaux.

M. Vicat a tenu à contrôler ces résultats en dosant l'acide carbonique dans un certain nombre de matières hydrauliques plus ou moins anciennes.

Le tableau suivant indique les proportions de chaux susceptibles d'être neutralisées par l'acide carbonique dosé, la chaux totale du mortier étant prise pour unité.

| COMPOSITION DES MORTIERS. | MILIEU où ils ont durci. | AGE des mortiers. | Proportion de chaux neutralisable par l'acide carbonique dosé dans le mortier. |
|--|---|-----------------------|--|
| Sable quartzeux et chaux du Theil .. | Sous mer libre | 5 ans. | 0,176 |
| Sable et chaux hydraulique ordinaire. (tranche superficielle fort mince). | En plein air..... | 10 ans. | 0,817 |
| Sable et chaux grasse ordinaire..... | Sous terre fraîche.. .. | 200 ans. | 0,556 |
| Sable, pouzzolane et chaux grasse.... | Sous mer, à Cherbourg... | 48 ans. | 0,595 |
| Sable, trass et chaux grasse..... | Sous mer, à Cherbourg.. | 48 ans. | 0,291 |
| Gangue de béton du port de Toulon.. | Sous mer libre | 10 ans. | 0,585 |
| — — du port de Cannes.. | Sous mer libre..... | 14 ans. | 0,488 |
| Parties superficielles du précédent.. | Sous mer libre..... | 14 ans. | 0,860 |
| Parties superficielles d'un mortier hy- draulique | En plein air..... | 10 ans. | la totalité. |
| Gangue à pouzzolane et chaux grasse tirée du soubassement d'un temple antique, près de Civita-Vecchia.... | Sous mer libre, après avoir été à l'air pendant une durée inconnue..... | 1800 ans au moins. | 0,767 |
| Gangue à pouzzolane et chaux grasse tirée des blocs sous-marins des môles antiques du port de Pouz- zoles | Constamment sous mer li- bre..... | 2500 ans au moins. | 0,700 |

Les résultats consignés dans ce tableau ont conduit M. Vicat à poser les conclusions suivantes :

1^o L'état intérieur d'un mortier quelconque, avec ou sans pouzzolane, relativement à la quantité d'acide carbonique qu'il contient, n'est qu'un état transitoire, tant que la chaux n'y est pas complètement carbonatée.

2^o L'état final, vers lequel tend l'état transitoire, est celui de la complète régénération de la chaux en carbonate neutre, qu'il s'agisse de mortiers à chaux grasse ou à chaux hydraulique, l'acide carbonique pouvant, sous l'influence des intempéries ou d'une certaine humidité, déplacer la chaux artificiellement combinée avec la silice et l'alumine.

Cet état final, à la vérité, n'arrive jamais, en raison des obstacles qui s'opposent à l'absorption de l'acide carbonique, surtout à l'intérieur des gros massifs.

L'intervention de l'acide carbonique a, dans tous les cas, pour effet de diminuer la solubilité des mortiers, proportionnellement aux progrès de sa combinaison avec la chaux qui s'effectue de dehors au dedans ; elle a pour effet, en même temps, d'augmenter considérablement la cohésion des mortiers.

Effet d'une dissolution de sulfate de magnésie. — M. Vicat, après avoir réduit en poudre fine les échantillons des trois premiers mortiers qui figurent au tableau précédent, les a immergés dans une dissolution contenant 4 parties de sulfate de magnésie anhydre pour 1000 parties d'eau pure. Les matras, dans lesquels s'effectuaient ces expériences, étaient hermétiquement clos pour empêcher l'accès de l'acide carbonique.

Par suite de l'affinité plus grande de l'acide sulfurique pour la chaux que pour

la magnésie, il y avait substitution de ces deux bases. En renouvelant la dissolution jusqu'au moment où elle ne donnait plus de précipité par l'oxalate d'ammoniaque, on obtenait, avec les trois mortiers, un résidu gélatineux dans lequel toute la chaux avait disparu, à l'exception de la portion combinée à l'acide carbonique.

Il résulte de ces expériences que tout mortier hydraulique ou non, quels qu'en soient l'âge et la durée et quel que soit le milieu où il a durci, étant réduit en poudre impalpable, est susceptible d'être attaqué par l'action prolongée d'une dissolution de sulfate de magnésie. Cette action se continue jusqu'au moment où le mortier a abandonné toute la chaux qui n'était point neutralisée par l'acide carbonique.

2° CEMENTS.

Action de l'acide carbonique et de l'eau. — Les ciments hydrauliques à prise rapide sont constitués par des silicates doubles d'alumine et de chaux mêlés accidentellement de sable, de peroxyde de fer et de magnésie en petite quantité; quelquefois, il peut s'y trouver un peu de sulfate de chaux provenant, soit des sulfures contenus dans les marnes à ciment, soit des vapeurs dégagées par les combustibles employés.

Ces ciments sont attaqués, de même que les mortiers à chaux hydraulique, par l'acide carbonique qui s'empare de la chaux des silicates.

M. Vicat cite deux exemples à l'appui de ce fait :

1° Un ciment de Pouilly, employé comme chape de faible épaisseur sur une casemate au bastion de la porte Saint-Laurent à Grenoble, après un séjour de 10 ans sous une terre fraîche rapportée et imprégnée d'acide carbonique, contenait sur 100 parties privées d'eau au rouge sombre :

| | |
|----------------------------|--------|
| Acide carbonique | 15,50 |
| Chaux. | 20,72 |
| Résidu argileux. | 65,78 |
| | <hr/> |
| | 100,00 |

2° Les parties superficielles enlevées au racleur sur un ciment de Grenoble, employé depuis 6 à 7 ans à la confection de tablettes et balustres et exposé à toutes les intempéries, ont donné à l'analyse :

| | |
|----------------------------|--------|
| Eau. | 16,24 |
| Acide carbonique | 19,00 |
| Chaux | 24,59 |
| Résidu argileux. | 40,57 |
| | <hr/> |
| | 100,00 |

Dans les deux cas, les proportions d'acide carbonique et de chaux sont très sensiblement celles qui correspondent à la composition du carbonate de chaux.

Cette transformation des silicates en carbonates s'effectue assez rapidement sur

les parties superficielles exposées au contact de l'eau ou d'une terre humide, mais elle arrive plus difficilement au centre des masses et se propage d'autant plus lentement que le ciment est moins poreux.

Effet d'une dissolution de sulfate de magnésie. — Les échantillons de ciments sur lesquels M. Vicat a expérimenté, après avoir été réduits en poudre impalpable, étaient traités par la dissolution de sulfate de magnésie dans les mêmes conditions que les échantillons de mortiers de chaux hydraulique. L'action de cette dissolution a eu pour effet de transformer les ciments en résidus gélatineux, quelques-uns ont même produit des flocons si légers qu'ils remplissaient toute l'étendue du liquide.

L'analyse de ces résidus a montré que les ciments avaient perdu des quantités considérables de chaux.

La chaux totale étant exprimée par l'unité, les quantités de chaux, restant après épuisement par la dissolution saline, ont été les suivantes :

| | |
|-------------------------------------|--------|
| Avec le ciment de Boulogne. | 0,2128 |
| — de Cahors | 0,1690 |
| — de Vitry-le-Français | 0,1528 |
| — de Guctary. | 0,1208 |
| — de Portland | 0,0588 |
| — de Grenoble. | 0,0501 |

M. Vicat a cherché vainement à établir des rapports entre ces résultats et la composition chimique de chaque ciment. Il n'a pu en déduire que cette conclusion : c'est que la quantité de chaux perdue est proportionnelle à celle qui existait dans le ciment et que, pour tous les ciments, l'altération produite par la faible dissolution de sulfate de magnésie est toujours très profonde.

3° GANGUES A POUZZOLANES ET CHAUX GRASSE.

M. Vicat s'est d'abord proposé de déterminer la quantité de chaux dont peut se saturer une pouzzolane quelconque réduite en poudre impalpable.

A cet effet, les poudres étaient immergées dans une eau de chaux, placée dans des matras fermés. Pendant les trois ou quatre premiers jours, elles restaient au fond des vases, sous la forme de dépôt boueux, mais au bout de ce temps, le dépôt commençait à foisonner et après un séjour de deux mois toutes les pouzzolanes volcaniques passaient à l'état de masse gélatineuse qui se répandait dans toute l'étendue du liquide. Les pouzzolanes artificielles soumises à ce même traitement ont donné des résultats analogues, toutefois le résidu gélatineux avait un peu moins de légèreté.

La saturation des pouzzolanes par la chaux n'est réellement complète qu'au bout de six mois.

M. Vicat a résumé dans le tableau suivant un certain nombre de résultats qu'il a obtenus par la macération de diverses pouzzolanes dans l'eau de chaux.

| DÉSIGNATION DES POZZOLANES. | QUANTITÉ DE CHAUX PRISE A L'EAU DE CHAUX | |
|--|--|---|
| | pour 100 parties de pouzzolane. | pour 100 parties de silicate d'alumine contenu dans la pouzzolane. |
| Pouzzolane de Rome..... | 16 | 25,81 |
| Pouzzolane brune de Naples..... | 9,76 | 10,28 |
| Pouzzolane grise de Naples..... | 7,50 | 12,69 |
| Trass des bords du Rhin..... | 8,21 | 15,24 |
| Pouzzolane de Bessan (Hérault).... | 8,87 | 16,56 |
| <i>Pouzzolanes artificielles.</i> | | |
| D'argile ferrugineuse d'Alger..... | 14,90 | 18,55 |
| D'argile ocreuse très fine..... | 27,45 | 50,68 |
| D'argile réfractaire du Cher..... | 14,52 | 18,50 |
| D'argile presque pure..... | 15,55 | 16,66 |
| De la même diminuée d'alumine..... | 18,82 | 18,82 |
| — diminuée davantage..... | 22,70 | 22,70 |
| — diminuée davantage..... | 32,04 | 32,04 |
| — diminuée davantage..... | 45,76 | 43,76 |
| <i>Substances exclusivement siliceuses.</i> | | |
| Substance extraite d'une argile très pure après traitement par l'acide sulfurique bouillant..... | 44,04 | » |
| Silice gélatineuse calcinée..... | 61,60 | » |
| La même simplement desséchée..... | 76 | » |

Il convient de remarquer que, d'après les chiffres de ce tableau, les quantités de chaux qui produisent la saturation complète sont d'autant plus grandes que les pouzzolanes sont plus siliceuses. Les chiffres les plus élevés ont été obtenus avec des matières dans lesquelles l'alumine faisait complètement défaut.

Effet de l'eau pure. — Cinq gangues à pouzzolanes et chaux grasses, ayant six mois d'âge et dépouillées des parties superficielles atteintes par l'acide carbonique, ont été pulvérisées et traitées par l'eau sans cesse renouvelée, dans des matras hermétiquement fermés.

Après un traitement de cinq à six mois, le liquide ne se troublait plus par l'oxalate d'ammoniaque et l'épuisement pouvait être considéré comme achevé. L'analyse des résidus, effectuée à ce moment, a donné les résultats suivants :

| DÉSIGNATION DES POZZOLANES introduites dans les gangues. | Quantités de chaux données à 100 parties de pouzzolane. | Parties de chaux restées après l'action de l'eau pure. | Chaux de saturation propre à chaque pouzzolane. |
|---|--|---|--|
| Pouzzolane de Saint-Paul à Rome..... | 16,24 | 10,43 | 16 |
| — brune du Vésuve à Naples..... | 15,54 | 2,49 | 9,764 |
| — grise (même provenance). | 15,51 | 5,18 | 7,500 |
| — brune de Bessan (Hérault)..... | 16,50 | 5,26 | 8,870 |
| — artificielle d'argile pure..... | 15 | 11,48 | 15,527 |

Il résulte de ce tableau que les gangues n'ont pas retenu des quantités de chaux égales à celles dont elles se sont saturées spontanément dans l'eau de chaux. Ce fait tient évidemment à ce que les pouzzolanes, entrant dans la composition des gangues, n'avaient pas été amenées au degré de finesse qu'on leur avait donné pour leur macération en eau de chaux et qu'ainsi leur saturation par la chaux n'avait pu être complète.

Les gangues, bien qu'ayant été porphyrisées avant immersion dans l'eau pure, ont dû y abandonner immédiatement de la chaux non combinée qui s'est trouvée enlevée, au fur et à mesure de sa dissolution, par le renouvellement des bains.

Dans la pratique, on est même loin d'avoir des mélanges aussi parfaits. Dans les gangues préparées par la méthode dite (*du tonneau*), le 1/4 à peine des pouzzolanes se combine à la chaux.

Effet d'une dissolution de sulfate de magnésie. — Les échantillons qui ont servi à cette nouvelle série d'expériences ont été prélevés sur les gangues déjà précédemment expérimentées. Le traitement par la dissolution de sulfate de magnésie a été effectué dans les mêmes conditions que pour les mortiers de chaux hydraulique et les ciments. On a obtenu finalement des résidus gélatineux qui, par comparaison avec la composition des gangues, ont donné les résultats suivants :

| DÉSIGNATION DES POZZOLANES dont les gangues ont subi l'effet de la dissolution magnésique. | QUANTITÉ DE CHAUX POUR 100 PARTIES DE POZZOLANE | |
|--|---|--|
| | introduites pour former les gangues. | restées après l'action du bain magnésique. |
| Pouzzolane des environs de Rome | 16,24 | 5,06 |
| — brune des environs de Naples..... | 15,54 | 0,00 |
| — grise — | 15,51 | 0,00 |
| — grise — (dite de feu)..... | 15 | 0,00 |
| Trass des bords du Rhin. | 15 | 0,00 |
| Pouzzolane de Bessan (Hérault) | 16,30 | 0,00 |
| — artificielle d'argile ferrugineuse..... | 15 | 0,00 |
| — d'argile ocreuse fine..... | 15 | 6,11 |
| — d'argile pure réfractaire..... | 15 | 8,93 |
| — — (autre variété)..... | 15 | 6,54 |
| — — (autre variété) | 15 | 8,50 |

Ce tableau ne fait pas mention de la chaux constitutive des pouzzolanes, elle s'est retrouvée en entier dans les résidus et l'action de la magnésie ne s'est exercée que sur la chaux introduite pour la confection des gangues.

Il résulte des chiffres insérés dans ce tableau que certaines pouzzolanes peuvent perdre, à l'état pulvérulent, toute la chaux qui leur avait été ajoutée; celles qui la retiennent le mieux sont des pouzzolanes d'argiles réfractaires ou celles que fournissent certaines argiles ocreuses. Ces dernières sont, d'ailleurs, également celles qui ont abandonné le moins de chaux au contact de l'eau pure et qui ont présenté la plus grande capacité de saturation pour la chaux.

Action de l'acide carbonique. — M. Vicat a recueilli les parties superficielles d'une gangue à pouzzolane volcanique et chaux grasse qui avait durci, pendant six ans, en eau douce.

L'analyse, après dessiccation naturelle à l'air, a donné :

| | |
|-------------------------------|--------|
| Eau. | 7,20 |
| Acide carbonique. | 8,50 |
| Chaux. | 17,35 |
| Silice, alumine, etc. | 67,15 |
| Total. | 100, » |

En déduisant, des 17,35 parties de chaux, la portion à l'état de combinaison avec les 67,15 parties de matières pouzzolaniques, soit 6,40; il reste 10,95 parties de chaux qui sont sensiblement neutralisées par les 8,50 parties d'acide carbonique. On peut donc dire que toute la chaux ajoutée à la pouzzolane est passée à l'état de carbonate neutre.

Cette puissante affinité de l'acide carbonique pour la chaux a été également constatée par M. Vicat sur un grand nombre de silicates doubles d'alumine et de chaux et dans les cas où elle semblait devoir s'exercer avec le plus de difficultés. Après avoir réduit ces silicates en poudre impalpable, et les avoir exposés à l'air humide d'une cave pendant huit mois, il a toujours trouvé que la totalité de la chaux s'était carbonatée.

CONCLUSIONS.

Les principaux résultats des expériences précédentes peuvent être résumés de la manière suivante :

1° Les hydrosilicates d'alumine et chaux, connus sous les noms de chaux hydrauliques, de ciments et de gangues à pouzzolanes, sont des combinaisons peu stables;

2° Tous ces silicates, sans exception, quels qu'en soient l'âge et la dureté, étant réduits en poudre aussi fine que possible et, sous cette forme, noyés dans une quantité suffisante d'eau pure, y abandonnent une notable quantité de chaux, lorsqu'ils n'ont subi, en aucune manière, ou du moins que très incomplètement, l'action de l'acide carbonique;

3° Dans les mêmes circonstances, si l'on substitue à l'eau pure une dissolution de 4 parties de sulfate de magnésie anhydre dans 1000 parties d'eau, la plus grande partie et le plus souvent la totalité de la chaux passe à l'état de sulfate, à moins qu'il ne s'y soit introduit de l'acide carbonique; dans lequel cas, il reste en chaux carbonatée tout juste ce que cet acide est capable de neutraliser;

4° Toutes les pouzzolanes volcaniques et artificielles employées jusqu'à ce jour ont une capacité propre et différente pour la chaux, capacité bien moindre que ne le supposent les dosages habituels;

5° Enfin, l'affinité de l'acide carbonique pour la chaux de ces divers silicates est si puissante, qu'à l'aide d'un certain degré d'humidité, et lorsque son accès est possible, il finit toujours par la neutraliser en totalité, en laissant en dehors tous

les autres principes qui, combinés ou non entre eux, ne se trouvent plus alors qu'à l'état de mélange dans le tissu de la masse transformée.



Action de l'eau de mer sur les matériaux hydrauliques à base de silice, d'alumine et de chaux. — Les effets de la mer libre ne peuvent être assimilés à ceux qu'elle produit lorsqu'on l'enferme dans les cuves d'un laboratoire.

En mer libre, les matériaux qui ont une tendance prononcée à incruster, à tapisser en quelque sorte les corps immergés, sont fournis à ces corps d'une manière continue, et toujours avec la même abondance. Dans le laboratoire, au contraire, l'eau de mer, y fût-elle renouvelée tous les jours, n'apporte chaque fois qu'une petite quantité de ces matériaux conservateurs et, dans l'intervalle, les composés hydrauliques restent sous l'influence prépondérante des sels destructeurs.

Lorsqu'on analyse les débris, devenus stationnaires, d'un composé hydraulique (mortier de chaux, ciment ou pouzzolane) désagrégré par l'action des sels de la mer, on y trouve :

1^o Un résidu de sable ou de matières pouzzolaniques;

2^o Un peu de carbonate de chaux;

3^o De la magnésie, libre, ou combinée avec la pouzzolane, ou encore à l'état de carbonate;

4^o Très peu de chaux neutralisée par la silice et souvent même point du tout;

5^o Enfin, quelques millièmes de sulfate de chaux et de magnésie, si l'on n'a pas suffisamment lavé les débris à l'eau pure avant de les analyser.

Si l'on pouvait agglomérer ces débris et reconstituer avec eux seuls une masse cohérente et résistante, il est évident que cette masse n'éprouverait plus aucune altération dans l'eau de mer.

Or la mer agit, parfois, sur certains composés hydrauliques, en les transformant en un nouveau corps ayant une composition chimique tout à fait analogue à celle de ces débris, mais sans que cette transformation soit accompagnée d'une destruction de la cohésion. Ces silicates, ainsi modifiés, sont devenus aussi bien inattaquables dans l'eau de mer employée dans le laboratoire que dans la mer libre.

Dans d'autres cas, lorsqu'on analyse les parties prises à quelques centimètres au-dessous de la croûte verdâtre qui enveloppe certains composés hydrauliques immergés depuis un assez grand nombre d'années pour ne laisser aucun doute sur la persistance indéfinie de leur stabilité, on y retrouve, parfois en totalité, les éléments du composé primitif sans introduction d'autres principes, et, chose remarquable, ces parties tirées de l'intérieur sont le plus souvent attaquées et détruites en quelques jours, dans la même eau de mer, employée dans le laboratoire.

La mer libre peut donc laisser subsister, dans toute l'intégrité de leur composition première, c'est-à-dire avec toute leur chaux attaquable, les silicates immergés lorsqu'elle les a recouverts d'enduits végétatifs, madréporiques ou coquilliers formant une sorte d'enveloppe imperméable.

De là, trois classes de composés hydrauliques par rapport à l'action de l'eau de mer, savoir :

1^o Ceux qui résistent par l'effet d'un changement de constitution chimique, intégral, ou limité en profondeur, que la mer y opère spontanément et qui n'ont, par conséquent, besoin d'aucun enduit preservativeur;

2° Ceux qui ne subsistent et ne peuvent subsister que sous la protection de pareils enduits ;

5° Ceux, enfin, sur lesquels ces enduits ne peuvent se maintenir, soit par la violence des coups de mer, soit par leur nature, et qui périssent par l'effet même des transformations chimiques que la mer tend à y introduire.

Les premiers peuvent être reconnus et appréciés par une simple expérience de laboratoire consistant à les immerger dans une eau de mer renouvelée de temps en temps. Les composés, qui auront résisté à cette épreuve, résisteront à *fortiori* en mer libre, puisqu'ils peuvent y trouver des auxiliaires utiles.

Quant aux composés de la 2^e et de la 3^e catégorie, les essais du laboratoire ne peuvent que les classer par ordre de stabilité.

Mode d'essai employé dans le laboratoire. — Les études de M. Vieat l'ont conduit à substituer aux immersions ordinaires dans l'eau de mer un nouveau mode d'essai qu'il a soigneusement décrit et motivé et qui permet d'obtenir des résultats comparatifs, plus certains. Sept années d'expériences ont prouvé qu'une simple dissolution de sulfate de magnésie (4 à 5 grammes de sel anhydre dans 1000 grammes d'eau pure) produit, sur les échantillons qu'elle baigne, exactement les mêmes effets que l'eau de mer. Les échantillons, avant d'être immergés dans cette dissolution, sont durcis à l'abri du contact de l'air, ils sont ensuite taillés en parallélépipèdes avec des arêtes aussi vives que possible. On les plonge alors dans le bain de sulfate de magnésie que l'on renouvelle assez fréquemment jusqu'au moment où l'oxalate d'ammoniaque ne le trouble plus.

C'est ordinairement par des fissures parallèles aux arêtes que se manifestent les premiers effets de l'action saline. Dès qu'elles apparaissent, l'échantillon doit périr infailliblement au bout d'un temps plus ou moins long, mais qui ne dépasse jamais quatre ans. L'apparition de ces fissures, dans le cas de composés destructibles, n'a pas d'époque fixe, elle peut se déclarer au bout de huit à dix jours, comme après huit à dix mois, mais assez rarement au delà de ce terme. Quelquefois, notamment sur certains ciments frits, très riches en chaux, les signes d'altération se manifestent sous la forme de pustules d'où sort une matière floconneuse blanche qui n'est autre que du carbonate de chaux mêlé d'un peu de carbonate de magnésie et d'alumine.

L'altération peut néanmoins quelquefois exister sans qu'aucun indice apparent le dévoile, c'est pourquoi il est encore essentiel de briser les échantillons au bout de dix mois d'immersion et de soumettre les morceaux aux mêmes essais.

Les mortiers qui auront résisté à ces épreuves auront certainement une résistance indéfinie en mer libre ; mais, cependant, on ne peut prétendre que tous les mortiers qui auront présenté des traces d'altération doivent être écartés comme destructibles. Tel de ces mortiers, qui aura été attaqué dans une expérience de laboratoire, peut très bien résister en mer libre. On pourra donc encore recourir à l'emploi de ces derniers si l'on a, comme preuve de leur solidité, l'exemple de constructions sous-marines existant depuis un grand nombre d'années ; mais il est important, dans ce cas, de ne pas s'écarter des conditions dans lesquelles ont été établies ces constructions. Il faut non seulement adopter les mêmes dosages et le même mode de confection, mais encore il faut s'astreindre à n'employer ces mortiers que dans les mêmes parages et dans une situation analogue par rapport aux coups de mer.

TRAVAUX DE MM. RIVOT ET CHATONEY.

I. MORTIERS DE CHAUX HYDRAULIQUE.

RÉACTIONS QUI DÉTERMINENT LA PRISE.

Il y a lieu de considérer deux cas : dans l'un, la chaux employée est une chaux siliceuse ; dans l'autre, la chaux provient de la calcination d'un calcaire argileux. Dans les deux cas, la chaux est supposée intimement mélangée avec du sable quartzeux, et le mortier ainsi composé forme un bloc qui est exposé à l'humidité avant d'être immergé dans l'eau de mer, conditions qui sont reconnues les plus favorables à la prise et à la solidité des mortiers.

1° *Chaux siliceuse.* — La chaux est éteinte et gâchée à l'eau de mer ; cette eau, dans laquelle domine le chlorure de sodium, contient un peu d'acide carbonique, quelquefois de l'acide sulfhydrique et différents sels tels que chlorhydrates et sulfates à base de soude, de chaux et de magnésie.

Pendant l'extinction, la chaux caustique s'hydrate ; puis, immédiatement, l'acide carbonique, l'acide sulfhydrique et les sels de magnésie réagissent sur l'hydrate et leur action se continue pendant le gâchage. Il se forme ainsi un peu de carbonate et de sulfate de chaux ; en même temps, il se précipite une petite quantité de magnésie, tandis que la chaux entre partiellement en dissolution.

Finalement, le bloc terminé contient du silicate de chaux encore anhydre, un excès de chaux à l'état d'hydrate, un peu de carbonate de chaux, de l'oxyde de fer et de la magnésie hydratée ; en outre, la masse est imprégnée d'eau tenant en dissolution de la chaux ainsi que des sels de chaux et de soude. Ces derniers sels ne peuvent exercer aucune action chimique sur la chaux libre et le silicate ; mais, par leur affinité pour l'eau, ils retardent la prise du mortier. M. Rivot attribue la solidification accompagnée de contraction à une cristallisation du silicate hydraté qui se fait progressivement et avec d'autant plus de facilité que la proportion de silicate est plus forte. Si cette proportion est inférieure à une certaine limite, la solidification n'est plus possible.

En outre, pour que l'arrangement des molécules de silicate puisse se produire, il est nécessaire que les matières interposées restent à l'état mou jusqu'à la cristallisation complète. De là, la nécessité d'empêcher toute dessiccation partielle qui pourrait être une cause de décomposition ultérieure.

La contraction, qui accompagne la cristallisation du silicate de chaux hydraté, a pour effet de faire affluer à la surface la chaux hydratée que l'acide carbonique de l'air fait passer à l'état de carbonate insoluble dans l'eau. Cependant, cette contraction est toujours assez faible ; car, d'un côté, la proportion de silicate de chaux est peu élevée, et d'un autre côté, le sable et les cailloux mélangés à la chaux s'opposent à un changement de volume appréciable ; il en résulte que la quantité de chaux

portée à la surface n'est pas ordinairement suffisante pour la recouvrir entièrement.

Si l'on vient à immerger le bloc en eau de mer, plusieurs mois après sa confection et quand on juge la cristallisation du silicate de chaux complète, d'autres réactions tendent à se produire :

L'eau chargée d'acide carbonique, de sels de soude, de chaux et de magnésie pénètre et se renouvelle plus ou moins facilement à l'intérieur du bloc, suivant l'état d'agitation de l'eau et le degré de porosité du mortier. L'hydrate de chaux encore libre se dissout ; il se forme à la fois du carbonate de chaux et un dépôt de magnésie, par suite de l'action de l'hydrate de chaux sur les sels de magnésie. Ces réactions se propagent de la surface vers l'intérieur du bloc, et comme l'eau qui arrive sur les couches internes s'est dépouillée de son acide carbonique, elle ne peut plus que dissoudre la chaux.

Ainsi, tandis qu'à la surface il y a formation de carbonate de chaux et dépôt de magnésie qui peuvent avoir l'effet utile de boucher les pores du mortier, l'intérieur devient de plus en plus poreux par suite de la dissolution lente de la chaux.

Il est donc important que la chaux hydratée qui forme en partie la couche superficielle soit rapidement et entièrement transformée en carbonate de chaux, de manière à former une enveloppe protectrice contre l'action de l'eau.

Dans les eaux qui contiennent beaucoup d'acide carbonique, il y a intérêt à employer des mortiers contenant relativement une forte proportion de chaux libre.

L'impossibilité où l'on se trouve souvent de maintenir les blocs de mortier dans un état d'humidité convenable pendant plusieurs mois, peut nuire à la cristallisation régulière du silicate de chaux et compromettre la solidité du mortier. C'est pourquoi il peut être préférable d'immerger le bloc peu de temps après sa fabrication, à la condition de le maintenir dans une eau tranquille. Le mortier fait prise, dans ce cas, à peu près dans le même temps, mais il est toujours plus poreux, ce qui s'explique par l'action dissolvante de l'eau.

2° *Chaux alumineuses.* — Si l'on emploie dans le mortier des chaux provenant de calcaires argileux, les réactions qui déterminent la prise sont analogues à celles que nous venons de décrire ; la différence principale résulte de la présence de l'aluminate de chaux, qui s'hydrate dans les mêmes conditions que le silicate et contribue avec lui au durcissement.

CAUSES DE DÉCOMPOSITION.

Si l'on a pris, dans la confection des blocs, toutes les précautions indiquées par la pratique, les causes de décomposition sont de deux sortes : les unes proviennent de la composition des chaux hydrauliques et du sable ; les autres, de l'action de l'eau ainsi que des gaz et des sels qu'elle renferme.

1° *Influence de la composition des chaux.* — Les calcaires qui fournissent des chaux hydrauliques peuvent contenir, outre les éléments indispensables, sable fin et

argile, des proportions variables de dolomie, de sulfate de chaux, de pyrites de fer, de sable quartzeux en gros grains; il y avait donc lieu de rechercher l'influence que chacun de ces corps pouvait avoir sur la qualité des produits de la calcination. Les observations faites par M. Rivot l'ont conduit aux conclusions suivantes :

Influence de l'oxyde de fer et du sable en gros grains. — L'oxyde de fer doit être considéré comme une matière inerte. En forte proportion, il ne peut avoir pour effet que de ralentir la prise. Il en est de même du sable en gros grains, qui ne donne qu'une quantité insignifiante de silicate de chaux pendant la cuisson.

Influence de la magnésie. — Les silicate et aluminat de magnésie se solidifient, en s'hydratant, comme les silicate et aluminat de chaux; mais tout porte à croire que leur hydratation se fait postérieurement à celle des composés de la chaux. Il en résulte que les mortiers composés de chaux hydrauliques magnésiennes peuvent, après la prise, éprouver des mouvements moléculaires qui détruisent la cohésion primitivement acquise. On s'explique ainsi le genre d'altération constaté avec l'emploi de ces chaux et caractérisé par une désagrégation des mortiers après durcissement préalable.

Des expériences de laboratoire ont, d'ailleurs, prouvé que le silicate et l'aluminat de magnésie acquièrent, en s'hydratant, une dureté supérieure aux composés similaires de la chaux.

Influence du sulfate de chaux. — Quand la proportion du sulfate de chaux dans un mortier dépasse une limite qu'il n'est pas encore possible de fixer d'une manière précise, ce mortier est de mauvaise qualité. Le sulfate, ayant été chauffé très fortement, s'hydrate, en effet, très lentement et sa cristallisation s'achève, en grande partie, après la prise du mortier.

L'augmentation de volume qui accompagne cette cristallisation peut, par suite, faire éclater quelques parties du mortier, surtout si le sulfate de chaux se trouve irrégulièrement réparti dans la masse et accumulé sur certains points.

On peut considérer, comme n'étant point nuisible à la qualité du mortier, une proportion de sulfate de chaux de 1 à 2 pour 100, lorsqu'elle est bien uniformément répartie.

2^e *Influence de la composition du sable employé avec la chaux.* — L'action d'un sable composé de grains de quartz et de carbonate de chaux est une action purement mécanique; mais, si l'on emploie des sables argileux ou des sables renfermant des silicates attaquables par voie humide à la température ordinaire, il se produit des actions chimiques très complexes qui peuvent devenir des causes de décomposition. Dans ce dernier cas, en effet, l'hydrate de chaux n'agit que très lentement sur le sable pour donner naissance à du silicate et à de l'aluminat de chaux, et ces composés, en s'hydratant longtemps après la prise de la chaux, peuvent en amener la désagrégation.

Il est à remarquer que les réactions postérieures à la prise sont seules à redouter; les réactions antérieures sont, au contraire, utiles, puisqu'elles ont pour résultat d'augmenter l'adhérence de la chaux au sable. D'après cela, il y a intérêt à faire,

préalablement, un mélange aussi intime que possible du sable bien mouillé avec la chaux éteinte en poudre et à laisser le mélange en repos pendant plusieurs mois avant d'entreprendre le gâchage.

On provoque ainsi l'action chimique de la chaux sur la partie attaquable du sable; le silicate et l'aluminate de chaux qui résultent de cette action étant tout préparés au moment du gâchage peuvent, dès lors, s'hydrater en même temps que les composés similaires qui forment la partie constituante des chaux hydrauliques.

Cette digestion préalable de la chaux en poudre avec le sable doit se faire dans des magasins humides et couverts, de telle sorte que les matières se trouvent en présence d'une quantité d'eau toujours suffisante pour empêcher leur dessiccation, et cependant trop faible pour hydrater les silicate et aluminate de chaux.

Pendant cette digestion, la chaux absorbe nécessairement un peu d'acide carbonique. Cette transformation partielle de la chaux en carbonate n'a ordinairement aucun inconvénient, car le mélange contient presque toujours un excès de chaux libre et il y a souvent avantage à diminuer la proportion de la chaux libre relativement à la chaux en combinaison avec la silice et l'alumine. On peut, d'ailleurs, limiter facilement l'action de l'acide carbonique de l'air en formant des tas un peu compacts et suffisamment élevés que l'on recouvre de toiles humides.

3^o *Action de l'eau ainsi que des gaz et des sels qu'elle renferme.*

Action de l'eau. — Supposons toujours un bloc de béton immergé après la prise. L'eau s'introduit dans les pores du mortier, dissout peu à peu l'hydrate de chaux en se renouvelant et augmente, par suite, la porosité. Quand toute la chaux est dissoute, l'eau décompose l'aluminate de chaux en lui enlevant la chaux, mais elle n'agit pas sur le silicate et le carbonate de chaux et, pour ce motif, les chaux siliceuses doivent mieux résister que les chaux alumineuses.

On peut diminuer la porosité qui résulte de l'action de l'eau, en ne laissant, dans les mortiers hydrauliques, que la quantité de chaux libre strictement nécessaire pour le gâchage, mais les difficultés d'application deviennent dans ce cas, assez grandes.

Il est préférable de préserver les mortiers, en empêchant l'eau de pénétrer à l'intérieur et surtout de se renouveler. Sous ce rapport, les coquillages, la vase, les herbes marines forment une enveloppe presque imperméable et qui est souvent très efficace.

Action des sels contenus dans l'eau. — Les sels de soude et de chaux sont sans action sur les composés de la chaux hydraulique, mais il n'en est pas de même des sels de magnésic, qui, en présence de la chaux, produisent un précipité de magnésie hydratée; ils peuvent également réagir sur l'aluminate de chaux et donner de l'aluminate de magnésie. La formation de ce dernier sel, dans une période de temps assez courte et en quantité un peu notable, peut produire, dans les mortiers, des mouvements moléculaires un peu énergiques et devenir une cause de désagrégation. Mais ce cas est cependant rare, car, d'un côté, l'aluminate de chaux est généralement en faible proportion et, d'un autre côté, l'aluminate de magnésie, au fur et à mesure de sa formation, est entraîné, du moins partiellement, par l'eau.

L'action des sels de magnésie dissous dans l'eau est donc analogue à celle de l'eau pure et en général moins énergique.

Action des gaz contenus dans l'eau. — La proportion d'acide carbonique contenue dans l'eau de mer est très variable, suivant les circonstances atmosphériques et les conditions locales. L'acide carbonique fait passer la chaux à l'état de carbonate; cette action se produit principalement à la surface du béton, vers laquelle afflue la chaux expulsée du centre par la contraction du mortier; elle est d'ailleurs très favorable à la conservation du mortier, puisqu'elle le rend moins perméable et tend par suite à contrarier l'action de l'eau.

Quand le durcissement s'opère dans une eau stagnante, ces deux actions contraires, celle de l'eau et celle de l'acide carbonique, s'exercent en même temps. La prédominance de l'une d'elles dépend de la composition des chaux, de la perméabilité initiale du mortier et de la proportion d'acide carbonique contenue dans l'eau.

Lorsque les chaux hydrauliques employées renferment beaucoup de chaux libre et l'eau de mer peu d'acide carbonique, il est indispensable de laisser le béton durcir à l'air avant de l'immerger; sans cette précaution, l'influence préservatrice de l'acide carbonique se trouve annulée par l'action dissolvante de l'eau, et quand toute la chaux libre est entraînée, l'acide carbonique agit sur l'aluminate et le silicate, en sépare lentement la chaux et vient ainsi contribuer à la désagrégation du mortier.

L'hydrogène sulfuré se rencontre aussi, souvent en proportion assez notable, dans l'eau de mer, en particulier dans la Méditerranée. Si l'on suppose un béton immergé après la prise, dans un avant-port où il sera alternativement découvert et recouvert par l'eau à chaque marée, l'hydrogène sulfuré formera aussi bien avec la chaux libre qu'avec la chaux combinée à l'alumine et à la silice des composés plus ou moins solubles dont la nature n'est pas bien déterminée. Ces composés, au contact de l'air, se transforment en sulfate de chaux qui se dissout à la marée montante, de sorte que l'hydrogène sulfuré devient dans ce cas une cause de désagrégation par décomposition progressive.

Si l'hydrogène sulfuré se trouve accidentellement en proportion un peu grande, son action destructive peut s'exercer d'une autre manière: il se produit, sur certains points, du sulfate de chaux qui en cristallisant soulève et fait tomber par écailles la croûte extérieure du mortier.

Une enveloppe naturelle ou artificielle sera encore un très bon préservatif contre l'action destructive de l'hydrogène sulfuré.

H. MORTIERS DE CEMENTS.

1° CIMENT A PRISE RAPIDE.

Ces ciments s'emploient ordinairement sans sable; ils résultent de la cuisson lente et modérée de calcaires argileux et contiennent à la sortie des fours: du sable,

de l'alumine, de l'oxyde de fer, matières qui peuvent être considérées comme inertes dans les réactions, une très petite quantité de chaux caustique, du carbonate de chaux non décomposé, enfin du silicate et de l'aluminate de chaux dont les compositions respectives sont représentées par les formules :



Dans les bons ciments à prise rapide, ces deux composés constituent plus de 90 pour 100 du produit. La proportion de chaux caustique par rapport au carbonate de chaux dépend du degré de cuisson ; une chaleur trop forte a pour effet d'augmenter la quantité de chaux caustique et de rapprocher la constitution du ciment de celle des chaux hydrauliques.

Réactions qui déterminent la prise. — Ces ciments, réduits en poudre fine et gâchés, font prise presque immédiatement et acquièrent en peu de temps leur maximum de dureté.

Ils contiennent alors le silicate de chaux hydraté $\text{SiO}^2 + 3\text{CaO} + 6\text{H}_2\text{O}$, un peu d'aluminate de chaux hydraté, un peu d'hydrate de chaux et des corps inertes : sable, oxyde de fer, alumine.

La rapidité de la prise est due à ce que l'enchevêtrement des cristaux formés par les silicate et aluminate hydratés peut se faire très facilement, grâce à la faible proportion de matières inertes mélangées.

Si toutes les parties du ciment ne sont pas également mouillées, elles ne se solidifient pas en même temps et il en résulte des fissures ; la mise en œuvre de ces ciments exige, pour ce motif, une grande habileté.

Indépendamment des soins apportés au gâchage, il peut encore se produire des fentes, assez longtemps après la prise, lorsque l'on fait usage de ciments magnésiens ; dans ce cas, elles sont dues à la présence du silicate de magnésie, qui ne cristallise pas en même temps que le silicate de chaux.

Causes de décomposition. — Les ciments à prise rapide ne sont guère employés que sous une faible épaisseur dans les travaux hydrauliques : le plus souvent, ils servent, comme enduits, à former une enveloppe imperméable, destinée à protéger les mortiers disjoints des maçonneries.

La présence du sulfate de chaux dans ces ciments est une cause de destruction rapide. S'il est irrégulièrement réparti, le sulfate de chaux en s'hydratant peut déterminer le soulèvement du ciment par écailles ; s'il est, au contraire, disséminé dans la masse, il est entraîné peu à peu par l'eau et rend le mortier perméable ; la désagrégation s'achève alors sous l'action de l'acide carbonique en dissolution dans l'eau.

La perméabilité constitue, pour les ciments, un inconvénient encore plus grand que pour les mortiers de chaux hydraulique, car ils ne contiennent pas, comme ces derniers, de la chaux libre susceptible de former du carbonate de chaux et de boucher ainsi plus ou moins les pores.

2° CEMENTS A PRISE LENTE.

Ces ciments sont obtenus par la cuisson à haute température de calcaires argileux ou de mélanges artificiels de carbonate de chaux et d'argile dans des proportions bien déterminées. La chaleur doit être assez forte pour faire entrer en fusion les angles des fragments, de sorte que les matières, à la sortie des fours, ne renferment plus de carbonate de chaux.

Les parties non agglomérées par la fusion contiennent un peu de chaux libre (5 à 6 pour 100), de l'oxyde de fer, de l'alumine, du silicate et de l'aluminate de chaux ayant pour formules :



Les parties agglomérées doivent contenir un silicate à plusieurs bases, dont la fusibilité est favorisée par la présence de l'oxyde de fer. Ces deux parties ont des propriétés hydrauliques très différentes, il y aurait intérêt à les séparer avant la mise en œuvre, mais ce triage n'est pas ordinairement adopté par les constructeurs.

Après leur pulvérisation, les ciments sont conservés pendant quelques mois dans des magasins un peu humides où ils absorbent 1,5 à 2 pour 100 d'eau. La chaux caustique, en passant ainsi à l'état d'hydrate, peut agir lentement sur le silicate multiple en poudre très fine et le transformer en silicate et aluminate de chaux, oxyde de fer libre ou combiné à la chaux. Si cette action n'était pas à peu près complètement terminée avant la prise, elle constituerait, plus tard, une cause de décomposition; de là, l'utilité de la conservation en magasin, qui est généralement reconnue par tous les fabricants.

Réactions qui déterminent la prise. — Les ciments à prise lente, mélangés au sable, sont utilisés notamment pour la confection des blocs artificiels destinés à être immergés.

Ces blocs, préparés dans des moules, sont conservés pendant plusieurs semaines, soit à l'air humide, soit dans une eau tranquille, avant d'être mis définitivement en place. La prise commence quelques heures après le gâchage, mais le durcissement du mortier n'arrive à son maximum qu'au bout de quelques mois.

La contraction pendant la prise est rendue moins sensible par le sable et les bloeages mélangés au mortier et n'a pas pour résultat, comme dans le cas des mortiers hydrauliques, de produire un extravasement de chaux vers la surface; elle a, à peu près uniquement, pour effet de rendre le mortier poreux et perméable.

Les réactions qui déterminent la prise sont analogues à celles que nous avons indiquées précédemment; toutefois l'analyse de ciments lents, immergés depuis longtemps, a montré que le silicate de chaux se trouvait combiné, dans ces ciments, avec une proportion d'eau moindre que dans les ciments vifs. Sa composition serait :



Les expériences faites n'ont pu déterminer si cette différence était due au mode

de production du silicate ou au mode de mise en œuvre des ciments pour la confection des blocs.

Les parties du ciment qui ont éprouvé un commencement de fusion se comportent d'abord comme des matières inertes et il est essentiel qu'elles soient bien disséminées dans la masse pour que les irrégularités dans la prise ne soient pas une cause de désagrégation.

Lorsque les blocs sont exposés à l'air humide avant d'être immergés, les différentes parties ne contiennent pas toutes la quantité d'eau nécessaire à la prise, et la solidification complète du bloc s'en trouve retardée; il est même possible que l'on constate, au moment de l'immersion, une diminution dans la dureté qui n'est, du reste, que momentanée. Si les blocs sont immergés, immédiatement après leur fabrication, dans une eau stagnante, les différentes parties se prennent ensemble, mais l'eau offre l'inconvénient de rendre le mortier plus poreux, en dissolvant la chaux libre et même une partie de la chaux combinée à l'alumine, de sorte que la solidité définitive peut être moins grande que dans le premier cas.

Causes de décomposition. — La première cause de destruction des mortiers de ciments à prise lente est la présence du silicate multiple dont nous avons parlé précédemment. En ce qui concerne les parties pulvérulentes, si le ciment n'est pas de fabrication très récente, les réactions se sont produites avant l'emploi; mais il n'en est pas de même pour les parties grossières, la décomposition ne s'opère, dans ce cas, qu'avec une très grande lenteur et, pour se mettre à l'abri de tout mouvement moléculaire ultérieur à la prise, il est préférable de séparer ces grains par un tamisage.

L'oxyde de fer contenu dans les matières employées pour la préparation des ciments n'agit qu'indirectement en déterminant la formation de ce silicate multiple.

La présence de la magnésie, en quantité notable, est pour les ciments lents, comme pour les ciments vifs, une cause sérieuse de désagrégation que l'on doit attribuer au défaut de concordance de la prise des composés de la chaux avec celle des composés de la magnésie.

Les mélanges de ciments divers peuvent donner de bons résultats, à la condition que les mouvements moléculaires qui se produisent au moment de la prise soient bien concordants; mais, comme rien n'indique les précautions à prendre pour obtenir cette concordance, il vaut mieux éviter ces mélanges.

Le sulfate de chaux, en proportion un peu notable, introduit dans le mortier des causes d'altération semblables à celles que nous avons indiquées pour les chaux hydrauliques. Il augmente la porosité du mortier ou le soulève par écailles.

L'eau, lors même qu'elle traverse la masse du mortier, en se renouvelant, ne peut amener sa désagrégation; elle n'a guère d'autre effet que d'augmenter sa perméabilité, en enlevant la chaux libre ou combinée à l'alumine.

Parmi les sels en dissolution dans l'eau, les sels de magnésie pourraient seuls avoir une action appréciable; mais cette action n'a qu'une très faible importance, car, après un certain temps d'immersion, le mortier ne contient plus de chaux hydratée. Quant à la double décomposition qui peut s'opérer entre l'aluminate de chaux et les sels de magnésie, elle n'est pas une cause de désagrégation des mortiers et ne les rend même pas sensiblement plus poreux.

L'acide carbonique dissous dans l'eau agit plus rapidement sur les mortiers de ciment que sur les mortiers de chaux hydraulique. La quantité de chaux libre que contiennent les ciments est, en effet, trop faible pour pouvoir, en se transformant en carbonate, boucher tous les pores du mortier; dès lors, l'acide carbonique agit presque immédiatement sur le silicate et l'aluminate de chaux, et la désagrégation est inévitable.

Comme il existe toujours une proportion plus ou moins grande d'acide carbonique en dissolution dans l'eau, il est indispensable de mettre les maçonneries en ciment à l'abri des courants d'eau, soit en adoptant un mode spécial de construction, soit en protégeant les maçonneries au moyen de dépôts coquilliers.

Pour combattre l'action destructive de l'acide carbonique, on a tenté de mélanger de la chaux aux ciments. Les résultats obtenus n'ont pas été très satisfaisants. Une des conditions essentielles de réussite est d'arriver à obtenir un mélange parfaitement intime. La proportion la plus convenable est de 8 à 10 parties de chaux grasse pour 100 de ciment. Le mélange doit être conservé pendant quelque temps à l'air humide pour assurer la décomposition du silicate multiple. Il convient, de plus, de séparer par un tamisage les grains un peu gros de silicate multiple qui ne seraient pas assez rapidement attaqués et pourraient produire, après la prise, des réactions nuisibles à la solidité du mortier.

L'emploi de chaux dans les ciments ne peut, d'ailleurs, convenir qu'avec des eaux très chargées d'acide carbonique, car il faut que la couche préservatrice de carbonate de chaux se forme entièrement et rapidement, sinon la chaux introduite se dissout, rend le mortier très poreux et l'expose à toutes les causes de décomposition déjà signalées.

Les mortiers de ciment et de chaux grasse sont préférables, dans certains cas, aux mortiers de chaux hydraulique; ils font prise plus rapidement et acquièrent une solidité plus grande.

Quant à l'action de l'hydrogène sulfuré en dissolution dans l'eau, elle est tout à fait sans importance. La formation de sulfate de chaux résultant de la réaction de l'hydrogène sulfuré sur la chaux de l'aluminate et peut-être du silicate ne peut avoir lieu qu'avec une extrême lenteur et dans des circonstances exceptionnelles; c'est donc une cause de désagrégation tout à fait négligeable par rapport à celle qui résulte de l'action de l'acide carbonique.

III. MORTIERS DE POZZOLANES.

Réactions qui déterminent la prise. — La prise et le durcissement des mortiers de pouzzolanes sont dus, comme dans les cas précédents, à la formation des deux composés hydratés de la silice et de l'alumine avec la chaux auxquels on a assigné, par analogie avec les mortiers de chaux hydraulique, la composition représentée par les formules :



Il existe, cependant, une différence essentielle avec les mortiers de ciments et de chaux hydraulique. Dans ces derniers, le silicate et l'aluminate ont été produits

par voie sèche, et leur hydratation, au moment de la mise en œuvre, détermine la prise ; tandis que dans les mortiers de pouzzolanes le silicate et l'aluminate hydratés se forment entièrement par voie humide, par l'action de la chaux grasse sur le silicate multiple qui constitue les pouzzolanes.

Cette action de la chaux est très lente et le durcissement du mortier ne se fait que progressivement, au fur et à mesure de la formation et de la cristallisation des deux composés hydratés de la chaux. Pour que ces cristallisations ne nuisent pas à la cohésion finale, il est important d'entretenir la pâte molle jusqu'à l'épuisement de l'action de la chaux sur le silicate. On réalise cette condition au moyen d'un excès de chaux et en ayant soin de soustraire le mortier à une dessiccation trop rapide.

Tant que les mortiers restent dans cet état de mollesse, il faut naturellement éviter de les exposer à des efforts extérieurs de quelque importance ou à des courants liquides qui pourraient amener leur décomposition avant la solidification complète.

Il est donc utile de conserver les bloes à l'air humide ou dans une eau stagnante pendant quelque temps après leur fabrication ; ou bien, il faut opérer, avant l'emploi, le mélange des trois matières : sable, pouzzolane et chaux en poudre et le laisser séjourner dans des magasins un peu humides.

Par cette digestion préalable, la chaux attaque la pouzzolane et donne du silicate et de l'aluminate de chaux anhydre, et le durcissement du mortier se produit, dans ce cas, très peu de temps après le gâchage. Il y a à craindre, toutefois, que l'action de la chaux ne se continue après la prise et ne détermine une désagrégation du mortier ; pour se mettre à l'abri de cette cause de destruction, il faut réduire, dans ce cas, la proportion de chaux grasse de manière à ne laisser que très peu de chaux libre au moment de la mise en œuvre.

La proportion la plus convenable doit être déterminée dans chaque cas. En principe, la chaux libre qui reste au moment de l'emploi doit être simplement suffisante pour opérer le gâchage et préserver les bloes de l'action destructive de l'acide carbonique.

Si, au lieu de chaux grasses, on emploie des chaux hydrauliques, les réactions qui suivent la prise sont beaucoup plus complexes. Le silicate et l'aluminate que renferme la chaux hydraulique s'hydratent et cristallisent, pendant que la chaux hydratée exerce son action lente sur la pouzzolane. Les mouvements moléculaires qui résultent de ces différentes réactions peuvent difficilement présenter une concordance satisfaisante, et il arrive souvent que les mortiers se désagrègent avant d'arriver au durcissement normal.

C'est pourquoi il convient, en général, de rejeter l'emploi de chaux véritablement hydrauliques dans les mortiers de pouzzolanes et de ne se servir, à défaut de chaux grasses, que de chaux très faiblement hydrauliques.

Il y a lieu de remarquer qu'en adoptant le procédé de digestion préalable des matières, les inconvénients de l'emploi de chaux hydrauliques ont moins d'importance, car les silicate et aluminate de chaux se trouvent alors formés au moment de l'emploi et, malgré leurs provenances différentes, ils sont mieux préparés pour une hydratation simultanée. On peut donc encore obtenir de bons mortiers à la condition que la chaux libre, après la digestion, ne reste qu'en faible proportion.

Généralement les bonnes pouzzolanes contiennent, en dehors de la silice, de

l'alumine et de la chaux : de l'oxyde de fer, de la magnésie et des alcalis. Il n'a pas été fait, jusqu'ici, d'expériences suivies, dans le but de déterminer le rôle que peuvent jouer ces divers oxydes ; théoriquement, leur présence ne paraît pas indispensable au durcissement ni de nature à exercer une action nuisible. Il est à présumer que l'oxyde de fer se combine avec la chaux pour donner naissance à un composé analogue à l'aluminate de chaux, mais il n'est pas prouvé que l'hydrate correspondant puisse acquérir, sous l'eau, la dureté de l'aluminate. La magnésie est séparée à l'état d'hydrate par la chaux et conserve, sous l'eau, un état gélatineux qui ne peut nuire à la prise. Quant aux alcalis, ils doivent être déplacés lentement par la chaux et avoir pour effet de retarder l'action de celle-ci sur la pouzzolane, retard qui, en réalité, n'a que bien peu d'importance.

Causes de décomposition. — Lorsque les mortiers de pouzzolanes ne sont pas exposés à être traversés par l'eau, il ne se produit qu'une dissolution très lente de la chaux libre ; cette dissolution peut même devenir tout à fait nulle si la proportion d'acide carbonique contenue dans l'eau est suffisante pour former une couche protectrice de carbonate de chaux.

L'hydrate de chaux, dont sont imprégnés les mortiers, se conserve, en tous cas, dans une eau stagnante, assez longtemps pour maintenir l'état de mollesse dont nous avons précédemment indiqué l'utilité au point de vue de la solidité finale.

Lorsque les mortiers peuvent, au contraire, être traversés par l'eau, leur conservation est beaucoup moins bien assurée, à moins qu'ils ne soient promptement recouverts de dépôts de coquilles, d'herbes, etc., ou que l'eau contienne assez d'acide carbonique pour faire passer à l'état de carbonate la plus grande partie de la chaux libre et empêcher la pénétration de l'eau, en bouchant tous les pores du mortier.

Mais ce dernier mode de préservation ne se réalisant que rarement, l'eau traverse les mortiers, dissout la chaux hydratée, et, à partir de ce moment, son action vient s'ajouter à celle de l'acide carbonique pour achever la destruction du mortier en décomposant les silicate et aluminate de chaux.

L'action de l'hydrogène sulfuré sur les mortiers de pouzzolane est analogue à celle qu'il exerce sur les mortiers de chaux hydraulique.

TRAVAUX DE M. FREMY

Au moment où M. Fremy entreprit ses remarquables travaux sur la constitution des ciments hydrauliques, on se trouvait en présence de deux théories relatives au phénomène de la prise.

D'après Vicat, la calcination d'un calcaire argileux donnait lieu à la formation d'un silicate double d'alumine et de chaux qui, en s'hydratant, devenait la cause de la prise des ciments. D'après MM. Rivet et Chatoney, cette prise était due à l'hydratation du silicate et de l'aluminate de chaux représentés respectivement dans les produits de la calcination par les formules $\text{SiO}_2, 3\text{CaO}$ et $\text{Al}_2\text{O}_3, 3\text{CaO}$.

M. Fremy se proposa de lever l'incertitude qui régnait sur cette importante ques-

tion et résolut d'étudier les propriétés et l'action mutuelle des quatre corps qui, d'après les auteurs des théories émises, constituaient les ciments hydrauliques, à savoir : 1° le silicate de chaux ; 2° le silicate double d'alumine et de chaux ; 3° l'aluminate de chaux ; 4° la chaux caustique.

Ce programme comportait un très grand nombre d'essais, dont les résultats ont mis en lumière bien des points jusque-là douteux et qui ont conduit M. Fremy à émettre des conclusions nouvelles sur la constitution des ciments et des matières pouzzolaniques et sur les causes qui déterminent la prise des mortiers hydrauliques.

Nous croyons devoir reproduire ici les principaux résultats de ses recherches tels qu'ils se trouvent exposés dans le mémoire que cet éminent savant a communiqué à l'Académie des sciences en 1865.

« *Silicate de chaux.* — J'ai, dit M. Fremy, produit synthétiquement les silicates de chaux par toutes les méthodes que la voie humide et la voie sèche m'ont permis d'employer. Dans ce but, j'ai eu recours à la double décomposition d'un silicate soluble par un sel de chaux. J'ai obtenu ainsi des silicates de chaux agrégés, frittés et fondus.

« Tous ces sels, réduits en poudre impalpable et mélangés ensuite avec de l'eau, ont produit des pâtes qui se sont desséchées lentement, mais qui n'ont jamais présenté le phénomène de la prise. Je me crois donc autorisé à dire que, si dans la calcination d'un calcaire argileux il se forme du silicate de chaux, ce n'est pas par l'hydratation de ce sel qu'on peut expliquer la prise du ciment.

« *Silicates doubles d'alumine et de chaux.* — Dans cette série d'essais, qui représente, comme la précédente, un nombre considérable d'expériences, j'ai combiné la silice par la voie sèche, non seulement avec l'alumine et la chaux, mais j'ai ajouté encore aux silicates alumino-calcaires des alcalis, de la magnésie et de l'oxyde de fer.

« Ces silicates se sont comportés dans leur contact avec l'eau comme les silicates de chaux ; ils n'ont jamais produit de prise comparable à celle qui caractérise les ciments hydrauliques. L'hydratation du silicate double d'alumine et de chaux qui peut prendre naissance dans la calcination du calcaire argileux, n'est donc pas la cause de la solidification dans l'eau des ciments hydrauliques.

« *Aluminates de chaux.* — J'ai étudié, avec les plus grands soins, les propriétés des aluminates de chaux, dont l'importance, dans la prise des ciments, a été signalée, avec beaucoup de raison et pour la première fois, par MM. Rivot et Chatoney.

« J'ai produit des aluminates de chaux, en calcinant, à différentes températures, des mélanges en proportions variables d'alumine et de chaux.

« Pour éviter toutes les causes d'erreur provenant des matières étrangères, l'alumine qui a été employée dans mes essais était pure et provenait de la calcination de l'alun ammoniacal : la chaux était également pure et a été produite par la calcination du spath d'Islande. Lorsque la chaux a été obtenue du spath d'Islande

par la calcination au fourneau à vent, elle ne fond pas, mais elle se transforme en une masse cristalline dont la cassure rappelle celle du marbre.

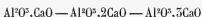
« Comme ces essais exigeaient souvent la température la plus élevée que peut donner un fourneau à vent et que les creusets ordinaires ne peuvent pas résister, dans ces conditions, à l'influence de la chaux, j'ai employé avec le plus grand avantage, dans la préparation des aluminates de chaux, les creusets de charbon métallique. Ils n'ont que l'inconvénient de laisser passer les vapeurs sulfureuses du combustible, qui produisent, à la surface des aluminates, des traces de sulfure de calcium cristallisé. On évite, dans cette calcination, l'influence du soufre en employant un double creuset en charbon et en plaçant de la chaux en poudre entre les deux parois du creuset.

« Dans cette étude des aluminates de chaux, j'ai d'abord constaté un fait fort curieux, c'est que l'alumine est un excellent fondant de la chaux qui même agit sur cette base avec plus d'efficacité que la silice. Opérant des mélanges à proportions diverses de chaux et d'alumine, j'ai pu obtenir des aluminates de chaux parfaitement fondus en chauffant au fourneau à vent des mélanges de 80 de chaux et de 20 d'alumine ; de 90 de chaux de 10 d'alumine.

« Le mélange de 95 de chaux et de 7 d'alumine s'est même fritté et est entré presque en fusion.

« Ces aluminates calcaires, qui contiennent une quantité de chaux si considérable, sont cristallisés, leur cassure est saccharoïde, leur réaction est fortement alcaline ; ils se combinent à l'eau avec dégagement de chaleur ; on peut presque les comparer à la chaux fondue.

« Ces aluminates de chaux très basiques, qui foisonnent dans l'eau comme de la chaux vive, ne peuvent jouer aucun rôle dans la prise des ciments hydrauliques ; mais il n'en est pas de même des aluminates de chaux représentés par les formules



qui sont moins basiques que les précédents.

« Lorsqu'on réduit ces aluminates en poudre fine et qu'on les gâche avec une petite quantité d'eau, ils se solidifient presque instantanément et produisent des hydrates qui acquièrent dans l'eau une dureté considérable. Les aluminates de chaux qui font prise ont, en outre, la propriété d'agglomérer des substances inertes comme le quartz. J'ai mélangé l'aluminate de chaux $\text{Al}^2\text{O}^3, 5\text{CaO}$ avec 50, 60, 80 pour 100 de sable, et j'ai obtenu des poudres qui, dans l'eau, acquièrent la dureté et la solidité des meilleures pierres.

« On comprend l'intérêt que peuvent présenter, au point de vue de la pratique, ces mélanges d'aluminates de chaux et de substances siliceuses, lorsqu'il s'agit de produire des bloes résistants à l'influence des agents atmosphériques et à celle de l'eau de la mer ; la solution des constructions résistant à la mer est probablement dans l'emploi de ces bétons, qui sont formés presque entièrement de substances siliceuses reliées entre elles par une faible proportion d'aluminate de chaux. On devra, dans ce cas, tenir compte des excellentes indications de M. F. Coignet, sur les conditions d'agglomération des ciments, dont j'ai constaté moi-même toute l'importance.

« Mes études sur les aluminates m'ont permis d'expliquer une des particularités les plus intéressantes de la fabrication des ciments de Portland. On sait que ces eiments, aujourd'hui si estimés, ne présentent de qualités que lorsqu'ils sont produits à une température très élevée. Or, j'ai reconnu précisément que les aluminates de chaux qui peuvent, à raison de leur composition, se solidifier dans l'eau, n'acquièrent cette propriété, à un haut degré, que lorsqu'ils sont exposés à une chaleur intense.

« J'ai constaté ce fait curieux en chauffant à des températures variables le même mélange d'alumine et de chaux : celui qui avait été fortement calciné au four à vent et qui était en fusion se trouvait beaucoup plus hydraulique que celui qui n'avait pas été chauffé à une température aussi élevée. Ainsi, dans la fabrication des ciments de Portland, la calcination a pour but de faire réagir, à une haute température, la chaux sur l'alumine et de déterminer la fusion de l'aluminate calcaire qui prend alors son maximum d'hydraulicité.

« Il résulte des différentes expériences que je viens d'analyser, que l'aluminate de chaux est le principal agent hydraulique des eiments qui sont à prise rapide. Ce composé calcaire est-il le seul agent de l'hydraulicité des eiments? C'est cette question importante qu'il me reste à examiner.

« *Action de la chaux grasse sur les corps divers.* — Si dans la calcination d'un calcaire argileux, il se produit de l'aluminate de chaux dont les propriétés ne peuvent plus être mises en doute, il se forme aussi, à n'en pas douter, pendant cette calcination, un silicate calcaire et un silicate double d'alumine et de chaux qui, comme on le sait, font gelée avec les acides, mais qui ne s'hydratent pas dans l'eau. Faut-il admettre que le silicate de chaux et que le silicate double d'alumine et de chaux, qui existent dans tous les ciments hydrauliques, ne jouent aucun rôle dans la prise des ciments au contact de l'eau? Je ne le erois pas; cette opinion me paraît confirmée par les expériences suivantes :

« J'ai déjà dit que les silicates n'exercent point d'action directe sur l'eau et ne peuvent pas être, sous ce rapport, comparés aux aluminates calcaires.

« Mais un eiment, après sa calcination, contient de la chaux libre; l'aluminate de chaux, en se décomposant dans l'eau, peut aussi en produire; j'ai pensé que cette base pourrait aussi exercer une action sur les corps qui ne s'hydratent pas immédiatement et leur faire jouer le rôle de pouzzolane.

« C'est cette hypothèse qui m'a fait entreprendre les expériences suivantes sur les propriétés et la composition des pouzzolanes.

« J'avais, d'abord, à examiner si, dans les ciments et les mortiers, la chaux grasse agit autrement qu'en absorbant l'acide carbonique de l'air ou en formant un hydrate qui se solidifie en desséchant.

« On sait que, dans ces derniers temps, l'action chimique de l'hydrate de chaux sur les pouzzolanes a été vivement contestée.

« Mes expériences ne laissent, à cet égard, aucun doute et prouvent qu'il existe réellement un certain nombre de corps qui peuvent contracter à froid une combinaison avec la chaux hydratée et produire des masses qui acquièrent dans l'eau une grande solidité.

« Pour déterminer la nature des corps qui jouissent de cette propriété remarquable, j'ai choisi presque tous les composés naturels et artificiels qui, par leur nature, pouvaient contracter une combinaison avec la chaux ; je les ai mélangés avec des quantités variables de chaux anhydre ou hydratée.

« Les corps qui ont été principalement expérimentés sont : la silice et l'alumine, pris sous leurs différents états, l'argile desséchée et cuite à diverses températures, es terres cuites, les silicates naturels ou artificiels, les principales roches, les phosphates et carbonates insolubles, les corps remarquables par leur porosité, tels que le charbon animal, plusieurs produits d'usine. En un mot, j'ai pris tous les composés qui, en raison de leur composition chimique ou de leurs propriétés physiques, par affinité chimique ou par affinité capillaire, pouvaient se combiner à la chaux ou s'unir mécaniquement avec elle.

« J'ai voulu également déterminer l'état de la chaux qui convient le mieux à action pouzzol anique.

« Mes expériences ont démontré, d'abord, que le composé qui se forme en hydratant la chaux avec précaution et qui est représenté par la formule $\text{CaO}, \text{H}_2\text{O}$, est celui qui, sous l'influence de l'eau, se combine aux pouzzolanes avec le plus de facilité.

« J'ai constaté en outre, que les véritables pouzzolanes, c'est-à-dire celles qui contractent à froid avec l'hydrate de chaux une combinaison durcissant dans l'eau, sont beaucoup plus rares qu'on le pense.

« Les terres cuites, les substances volcaniques, les argiles plus ou moins calcinées, que l'on considère généralement comme des pouzzolanes, ne doivent pas être comprises dans cette classe de corps, et, à quelques exceptions près, ne durcissent pas dans leur contact avec l'hydrate de chaux.

« Les substances réellement actives, les véritables pouzzolanes, sont les silicates de chaux simples ou multiples qui ne contiennent que 30 ou 40 pour 100 de silice, et qui sont assez basiques pour faire gelée avec les acides.

« Comme les bons ciments hydrauliques contiennent précisément des silicates simples ou multiples excessivement basiques et faisant gelée avec les acides, j'ai donc été conduit à admettre que le rôle de ces corps dans la prise des ciments était d'agir comme pouzzolanes et de se combiner, sous l'influence de l'eau, à la chaux libre qui existe dans les ciments.

« Ces observations sont complètement d'accord avec celles de M. Chevreul, d'après lesquelles il a établi que les pouzzolanes s'unissent à la chaux en raison d'un phénomène d'affinité capillaire.

« Après avoir étudié les propriétés et la composition des différents éléments qui se trouvent dans les ciments, je résumerai la théorie de leur hydraulicité dans les propositions suivantes :

« Je n'admets pas, comme on le croit encore généralement, que la prise des ciments hydrauliques soit due à l'hydratation du silicate de chaux ou à celle du silicate double d'alumine et de chaux : ces sels ne contractent pas de combinaison avec l'eau.

« Pour moi, la prise d'un ciment hydraulique est le résultat de deux actions chimiques différentes : 1^o de l'hydratation des aluminates de chaux ; 2^o de la réaction de l'hydrate de chaux sur les silicates d'alumine et de chaux qui existent dans tous les ciments et agissent, dans ce cas, comme pouzzolanes.

« La calcination d'un calcaire argileux ne donne lieu à un bon ciment hydraulique que quand les proportions d'argile et de chaux sont telles, qu'il puisse se former, en premier lieu, un aluminat de chaux représenté par une des formules :



« En second lieu, un silicate de chaux simple, ou multiple très basique, faisant gelée avec les acides, se rapprochant des formules suivantes :



et en troisième lieu, de la chaux libre pouvant agir sur les silicates pouzzolaniques précédents.

« Dans un grand nombre de cas, la composition chimique du calcaire argileux n'est pas la seule condition qui détermine la qualité du ciment; il faut encore que la réaction de la chaux sur l'argile s'opère aux températures les plus élevées.

« C'est, en effet, cette excessive chaleur qui produit les éléments hydrauliques du ciment dans les conditions de basicité qu'exige la prise dans l'eau et qui, en faisant fondre l'aluminat de chaux, lui donne toute son activité. »

M. Fremy a été ainsi amené à émettre les principes suivants :

Un ciment hydraulique est toujours formé de deux parties différentes : l'une est de la pouzzolane et l'autre est de la chaux grasse; par conséquent, la prise d'un ciment hydraulique est toujours due à un phénomène pouzzolanique.

Pour confirmer cette théorie, il fallait démontrer que des pouzzolanes véritables, à prise lente ou rapide, prennent naissance dans la calcination des calcaires argileux, que leur action sur la chaux grasse explique parfaitement la prise des ciments hydrauliques et que l'hydraulicité disparaît dès qu'on paralyse le phénomène pouzzolanique.

La nécessité de cette démonstration a donné lieu à de nouvelles séries d'expériences qui ont été résumées dans un second mémoire inséré aux *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 1868.

M. Fremy établit d'abord que les seuls éléments de l'argile, lors même qu'ils ne reçoivent pas l'influence de la chaux pendant la calcination, peuvent donner naissance à des pouzzolanes énergiques.

« On sait, dit M. Fremy, qu'une pouzzolane est un corps qui, à l'état isolé, n'exerce aucune action sur l'eau, mais qui, mélangé à la chaux grasse, prend, sous l'influence de l'eau, une dureté comparable à celle de la pierre.

« L'argile, prise à son état normal, c'est-à-dire hydratée, ne présente, dans aucun cas, les caractères des pouzzolanes. Mélangée à 20 pour 100 de chaux hydratée, elle ne durcit jamais dans son contact avec l'eau; mais lorsqu'on la calcine à une température suffisante, on la transforme en une pouzzolane qui, en agissant sur la chaux grasse, peut se solidifier complètement sous l'eau.

« J'ai examiné avec le plus grand soin ce phénomène curieux, qui avait déjà été étudié par Vieat et qui est fondamental pour la théorie de l'hydraulicité.

« J'ai reconnu d'abord que la transformation de l'argile en pouzzolane par l'action de la chaleur est indépendante des corps étrangers que l'argile retient ordinairement, tels que chaux, magnésie, alcalis, oxyde de fer.

« Opérant sur des argiles réfractaires très pures, telles que celles des Forges du

Nord, qui contiennent 65 pour 100 de silice, 25 pour 100 d'alumine et 10 pour 100 d'eau, et qui peuvent être représentées par la formule



je les ai transformées par la calcination en pouzzolanes excellentes. Les proportions de corps étrangers contenus dans ces argiles sont insignifiantes et sans action sur les propriétés hydrauliques du composé, comme je l'ai reconnu dans de nombreux essais. Ainsi la propriété pouzzolanique appartient au silicate d'alumine hydraté pur et n'exige pas, pour se manifester, comme on l'a quelquefois soutenu, l'influence de la chaux.

« La transformation de l'argile en pouzzolane est, au contraire, fortement influencée par les conditions différentes de la calcination. Une simple dessiccation est insuffisante pour transformer l'argile en pouzzolane; mais lorsque l'argile est chauffée à 700° environ, elle se déshydrate complètement et se change en pouzzolane; ainsi le développement du caractère pouzzolanique dans l'argile concorde avec sa déshydratation.

« En continuant à chauffer l'argile au rouge et même en l'exposant pendant plusieurs heures à la température élevée d'un four Siemens, on ne fait que ralentir la manifestation des propriétés pouzzolaniques sans les faire disparaître.

« Par des calcinations faites à des températures variables, on peut donc produire, avec de l'argile seule, des pouzzolanes à prise plus ou moins rapide.

« Que se passe-t-il dans la calcination d'une argile? Pourquoi ce corps qui, à l'état hydraté, n'agissait pas sur la chaux, a-t-il acquis, par la calcination, la propriété de se combiner à cette base.

« Ce fait important peut être facilement expliqué.

« En me fondant sur les réactions étudiées par M. Chevreul, j'admets que, par la calcination, l'argile a donné naissance à une sorte de tissu minéral poreux qui peut absorber la chaux; or, on sait que depuis longtemps M. Chevreul attribue la prise des ciments hydrauliques à l'affinité capillaire.

« En second lieu, m'appuyant sur les propriétés de l'argile étudiées par Vicat, et sur des faits que j'ai développés dans mes mémoires sur les acides métalliques, j'explique d'une autre manière le pouvoir pouzzolanique que la chaleur développe dans les argiles.

« Les deux éléments constitutifs de l'argile, c'est-à-dire la silice et l'alumine, étant une fois isolés de l'argile et se trouvant sous des états allotropiques particuliers, possèdent des propriétés pouzzolaniques incontestables signalées par Vicat.

« Or il est facile de prouver que la déshydratation de l'argile a pour effet de mettre en liberté une certaine quantité de silice et d'alumine. Il suffit, en effet, de chauffer l'argile au rouge et de la traiter ensuite par les acides, on enlève ainsi une proportion considérable d'alumine, que les mêmes acides ne pouvaient dissoudre avant la calcination.

« La chaleur met donc en disponibilité dans l'argile des éléments qui d'abord se trouvaient combinés entre eux. Puisqu'il est établi, en outre, par des expériences directes, que la silice et l'alumine isolées se comportent comme des pouzzolanes, il devient facile de comprendre la transformation de l'argile en pouzzolane par l'action de la chaleur.

« Cette décomposition de l'argile par la calcination ne doit pas surprendre. L'argile, en effet, est un silicate d'alumine hydraté; or, j'ai prouvé qu'il existe un grand nombre de sels hydratés dans lesquels l'eau est constitutive, et qui se décomposent entièrement par le seul fait de la déshydratation; cette propriété curieuse se constate dans les sels qui contiennent des acides faibles, tels que les acides métastannique, antimonique, antimonieux, plombeux, silicique, etc.

« En traitant de la polyatomicité de l'acide silicique, j'ai même signalé des phénomènes qui s'appliquent directement à l'argile et qui expliquent sa transformation en pouzzolane par la calcination.

« J'ai démontré que certains silicates alcalins de la formule $(\text{SiO}_2)^x\text{MO}, \text{Aq}$ se décomposent d'une manière si nette, lorsqu'on les déshydrate par la chaleur, que le produit de la calcination, qui d'abord était soluble, s'est transformé en une masse siliceuse insoluble et en alcali libre que l'eau peut enlever.

« C'est une décomposition de cette nature que l'argile éprouve par la calcination. On comprend donc facilement que, dans la calcination d'un calcaire argileux, les éléments seuls de l'argile, isolés par la chaleur et se trouvant en présence de la chaux, puissent donner naissance à une prise hydraulique.

« Mais cette explication serait incomplète si je me bornais à faire jouer un rôle pouzzolanique à la silice et à l'alumine qui sortent des argiles à la suite d'une calcination.

« Il est incontestable que lorsqu'on calcine un calcaire argileux, les éléments de l'argile non seulement se séparent, mais encore se combinent à la chaux. Ce qui le démontre, c'est l'action de l'acide chlorhydrique, qui, d'abord, ne faisait pas gelée avec le calcaire argileux et qui, après la calcination, produit une gelée abondante de silice.

« S'il existe des pouzzolanes binaires formées uniquement de silice et d'alumine, il en existe aussi de ternaires contenant de la chaux comme troisième élément; il peut s'en produire encore de plus complexes. Ce sont ces pouzzolanes à plusieurs bases qui prennent naissance, lorsqu'un mélange naturel ou artificiel d'argile et de calcaire est soumis à une température élevée.

« Ainsi, dans la calcination d'un calcaire argileux, il peut se produire deux espèces différentes de pouzzolanes; les unes résultent de la seule modification que l'argile éprouve par l'action de la chaleur; les autres sont formées par la combinaison de l'argile avec la chaux.

« Ces deux espèces de pouzzolanes, se trouvant en présence de la chaux libre qui existe dans tous les ciments, déterminent leur prise hydraulique.

« Pour confirmer cette théorie de l'hydraulicité, il fallait démontrer que tous les ciments sont formés effectivement de 2 parties, l'une calcaire et l'autre pouzzolanique et prouver, en outre, que leur prise dans l'eau était bien due à l'action mutuelle de ces deux corps. Les expériences suivantes, étendues à un grand nombre de ciments différents, paraissent donner rigoureusement cette démonstration :

« La présence de la chaux libre dans un ciment se démontre facilement en soumettant le ciment à l'action des dissolvants de la chaux : eau, eau sucrée, etc.

« Pour établir la composition pouzzolanique d'un ciment, je soumetts à l'action de l'acide chlorhydrique un ciment hydraulique très actif, tel que celui de Pouilly, dont l'hydraulicité a été attribuée à un phénomène d'hydratation de silicates; l'a-

cide est employé en quantité suffisante pour dissoudre toute la chaux libre, mais il n'est pas assez concentré pour attaquer la pouzzolane que le ciment contient.

« Le ciment de Pouilly, ainsi privé de sa chaux libre, a perdu toutes ses propriétés hydrauliques ; la partie insoluble dans l'acide se comporte dans l'eau comme un corps inerte ; elle fait gelée avec les acides concentrés et résulte de la combinaison de la silice avec l'alumine, la chaux et l'oxyde de fer.

« Mais si ce corps, qui a résisté à l'action des acides étendus, ne possède par lui-même aucune propriété hydraulique, il l'acquiert immédiatement, dès qu'il est mélangé à la chaux, et constitue alors un corps qui présente toute l'hydraulicité du ciment de Pouilly. On peut donc admettre que le ciment, sur lequel l'expérience précédente a été faite, est bien un mélange pouzzolanique, puisqu'on le paralyse en lui enlevant la chaux qu'il contient et qu'on le régénère en lui rendant la chaux que les acides ont dissoute. »

En présence de tous ces faits, M. Fremy est conduit à énoncer de la manière suivante la théorie de l'hydraulicité des ciments :

1^o Tout ciment hydraulique est un mélange de pouzzolane et de chaux. Sa prise est due à l'action de la chaux hydratée sur la pouzzolane qu'il contient, et non à l'hydratation des silicates produits dans la calcination.

2^o Les pouzzolanes présentent les compositions chimiques les plus diverses ; elles peuvent être formées par de la silice et par de l'alumine sous certains états allotropiques, par de l'argile calcinée, par des silicates simples ou doubles, sans parler des composés magnésiens.

3^o Dans la calcination d'un calcaire argileux, différentes pouzzolanes binaires et ternaires peuvent prendre naissance ; les propriétés hydrauliques dépendront alors de la nature ou de la proportion de l'argile qui se trouvait dans le mélange et aussi de la température à laquelle la calcination a été portée.

En s'appuyant sur cette théorie, M. Fremy attribue les accidents observés dans l'emploi des ciments à l'incertitude que présente leur composition. En premier lieu, on ne connaît jamais la nature de la pouzzolane qui s'y trouve et qui constitue cependant la qualité réelle du ciment. En second lieu, les différences de température dans la calcination peuvent produire, avec le même mélange, les ciments les plus divers. C'est ainsi que l'on désigne sous les noms différents de Portland, de ciments romains, de chaux hydrauliques, les parties différemment chauffées d'un même mélange d'argile et de calcaire.

M. Fremy pense qu'on obtiendrait des résultats plus certains si, au lieu de fabriquer directement ces mélanges mal définis de chaux et de pouzzolane qui constituent les ciments, on préparait d'abord des pouzzolanes artificielles de composition bien déterminée que l'on mélangerait ensuite avec des quantités convenables de chaux grasse.

A l'appui de cette théorie, nous devons citer les expériences de Feichtinger qui viennent confirmer le rôle de la chaux libre dans les ciments en démontrant que sa présence est indispensable pour la prise :

Si l'on fait une bouillie avec du ciment de Portland et une dissolution très concentrée de carbonate d'ammoniaque, la majeure partie de la chaux se transforme en carbonate et la prise n'a plus lieu. Si, par un lavage, on enlève le carbonate d'ammoniaque en excès, qu'on sèche le ciment et qu'on en fasse du mortier avec

de l'eau, ce mortier ne durcit pas, mais on lui rend immédiatement la faculté de faire prise en lui restituant un peu d'hydrate de chaux.

De même, si l'on met dans un cylindre du ciment de Portland mélangé à une petite quantité d'eau, en faisant traverser la masse par un courant d'acide carbonique, une grande partie de la chaux passe à l'état de carbonate. Après ce traitement, le ciment séché et employé dans la confection d'un mortier ne fait pas prise, mais il durcit très bien si l'on y ajoute un peu d'hydrate de chaux.

TRAVAUX DE M. H. LE CHATELIER.

M. Le Châtelier a entrepris, récemment, des recherches d'un genre tout nouveau sur la constitution des ciments à prise lente et sur la théorie de leur prise. Ses premières études ont fait l'objet d'une note présentée à l'Académie des sciences¹ et que nous croyons devoir reproduire intégralement.

Quand on examine au microscope polarisant une plaque mince taillée dans la masse, d'aspect pierreux, qui sort des fours à ciment de Portland et dont le broyage fournit le ciment marchand, on y distingue diverses espèces chimiques. N'ayant pu réussir à en faire la séparation mécanique pour les analyser, M. Le Châtelier a cherché à déterminer leur nature en comparant leurs caractères optiques à ceux de composés calcaires qu'il a reproduits par synthèse.

Voici les espèces qui présentent les caractères les plus saillants :

1° *Substance n'agissant pas sur la lumière polarisée.* — Elle consiste en aluminat de chaux, riche en chaux, mélangé quelquefois de chaux libre. M. Le Châtelier a, en effet, reproduit artificiellement l'aluminat de chaux tricalcique, $\text{Al}_2\text{O}_3, 5\text{CaO}$; il a vérifié qu'il cristallise dans le système cubique; il a vérifié, en outre, qu'avec la chaux c'est le seul des composés pouvant exister dans les ciments qui cristallise dans ce système.

2° *Substance agissant faiblement sur la lumière polarisée et présentant des formes cristallines très nettes.* — C'est un silicate de chaux; M. Le Châtelier y voit le principal, sinon le seul élément actif des ciments; cette substance forme toujours la majeure partie et quelquefois même la totalité des ciments de Portland.

Il croit pouvoir affirmer que c'est le péridot calcaire $\text{SiO}_2, 2\text{CaO}$ qui, lors de la cuisson du ciment, cristallise dans la substance dont nous allons parler, lorsqu'elle est portée à la fusion.

3° *Substance fortement colorée en brun agissant sur la lumière polarisée.* — C'est la plus faible des substances existant dans les ciments; elle forme, à l'état solide, la gangue du silicate qui vient d'être défini, et, à l'état fondu, le véhicule de sa cristallisation. C'est un aluminoferrite de chaux, plus pauvre en chaux que l'aluminat tricalcique; M. Le Châtelier lui attribue la formule $2(\text{AlFe})_2\text{O}_3, 5\text{CaO}$.

Il a reproduit directement les composés répondant à cette formule et y a retrouvé

les caractères optiques et la fusibilité de la substance signalée dans les ciments.

Cette substance s'altère très lentement dans l'eau et se modifie peu lors de la prise.

4° Petits cristaux agissant très énergiquement sur la lumière polarisée. —

Ils sont peu abondants et n'éprouvent aucune altération au contact de l'eau. Ce sont probablement des composés magnésiens, car M. Le Châtelier a reconnu que tous les composés calcaires très basiques s'altèrent dans l'eau, à l'encontre des composés magnésiens.

Les éléments effectifs du ciment sont donc : en première ligne, un péridot calcaire $\text{SiO}_2, 2\text{CaO}$; en seconde ligne, un ou plusieurs aluminates et ferrites de chaux.

L'existence des aluminates cristallisés dans les ciments avait déjà été signalée par M. Fremy, dont le travail a été le point de départ des recherches de M. Le Châtelier.

D'un autre côté, en ce qui concerne les phénomènes successifs de la prise des ciments, voici ce que M. Le Châtelier a constaté, en les suivant au microscope polarisant :

L'action de l'eau produit plusieurs composés; celui qui joue le rôle principal dans le durcissement définitif cristallise en lamelles hexagonales analogues à celles de l'hydrate de chaux CaO, HO ; mais jusqu'ici on n'a pu en réunir une quantité suffisante pour en déterminer la composition. C'est, en tous cas, un produit dérivant du péridot calcaire; il est, en effet, beaucoup plus abondant dans les ciments non alumineux et exclusivement formés de ce silicate.

Il se forme encore, mais seulement dans les ciments alumineux, de longues aiguilles qui s'enchevêtrent en tous sens et dont la proportion devient considérable dans les ciments à prise rapide; les cristaux, abandonnés à l'air sec, se déshydratent en éprouvant un retrait considérable; chauffés dans l'eau vers 50° , ils éclatent et se réduisent en poussière. Ils résultent de l'action de l'eau sur l'aluminate tricalcique, ainsi que M. Le Châtelier l'a vérifié en opérant sur l'aluminate préparé directement. Il a constaté, de plus, que ce corps $\text{Al}_2\text{O}_3, 3\text{CaO}$ se dissout dans l'eau pure à la proportion de $0^{\text{gr}}, 3$ par litre et dans l'eau salée en plus forte quantité, mais en se décomposant partiellement.

Ces remarques expliquent les différences constatées dans la pratique, entre les ciments à prise lente et les ciments à prise rapide, toujours très alumineux.

En outre, M. Le Châtelier a reconnu la production, dans la prise des ciments, d'autres substances n'agissant pas sur la lumière polarisée, mais il n'a pu jusqu'ici leur assigner ni composition, ni rôle dans la prise.

Le péridot calcaire possède une propriété remarquable, qui doit donner la clef d'un phénomène assez fréquent dans la fabrication des ciments. Chauffé jusqu'à ramollissement, c'est-à-dire jusqu'à la température de fusion du fer doux, puis abandonné à un refroidissement progressif, il se présente d'abord sous la forme d'une matière pierreuse à demi translucide, puis la masse se désagrège et se réduit finalement en une poussière impalpable, formée de débris de cristaux maclés avec une finesse extrême.

L'inégale dilatation des faces amenées en contact par les maçles est sans doute la cause de la rupture. Mais, si la cristallisation a lieu à une température moins élevée,

les macles n'existent plus et il n'y a plus de pulvérisation par le refroidissement.

M. Le Châtelier a reproduit des cristaux non macelés de périclase calcaire, cristaux semblables à ceux des ciments, par précipitation chimique dans le chlorure de calcium fondu, qui joue là le même rôle que les aluminates dans la fabrication des ciments.

TRAVAUX DE M. LANDRIN.

Les récentes recherches de M. Landrin sur les causes de la prise des composés hydrauliques présentent également un assez vif intérêt, au point de vue de la solution de cette question si controversée¹.

En premier lieu, M. Landrin s'est préoccupé de comparer l'action de la silice, à différents états, sur l'eau de chaux. Les variétés de silice sur lesquelles il a expérimenté sont les suivantes :

1° La silice insoluble dans les acides, produit qu'il désigne sous le nom de *silice hydraulique* et qu'il a obtenu en lavant et séchant au rouge sombre, à plusieurs reprises, la silice obtenue par la décomposition d'une solution de silicate de potasse au moyen d'un acide.

2° La silice gélatineuse, préparée en traitant à froid du silicate de potasse par un acide et en lavant ensuite à grande eau le précipité.

3° La silice soluble, préparée par dialyse, comme l'a indiqué Graham.

4° La silice provenant de la séparation de l'acide hydrofluosilicique.

Les trois premiers produits, mis en contact avec l'eau de chaux, ont agi sur elle plus ou moins rapidement, mais la quantité finale de chaux absorbée s'est constamment maintenue entre 56 et 58 pour 50 de silice, d'où il résulte que la formule $3\text{SiO}_2, 4\text{CaO}$, qui correspond sensiblement à ces proportions, doit être celle du composé qui tend à se former dans cette action pouzzolanique.

La silice hydraulique, mélangée avec une ou plusieurs fois son poids de chaux pure, jouit, d'ailleurs, comme les pouzzolanes, de la propriété de faire prise sous l'eau et même de former avec le sable de véritables matières hydrauliques. Dans le composé qui se forme ainsi, la silice est redevenue soluble dans les acides, et la proportion de silice soluble croît proportionnellement à la durée de l'immersion.

Cette propriété hydraulique de la silice n'est pas due seulement à son état de division, car la silice provenant de la préparation de l'acide hydrofluosilicique, quoique aussi légère que la silice hydraulique, ne fait prise, dans aucun cas, avec la chaux.

M. Landrin arrive à conclure de ses expériences que les pouzzolanes ne doivent leurs propriétés hydrauliques qu'à la silice hydraulique qu'ils contiennent.

Il fait remarquer, à ce sujet, que cette silice hydraulique se retrouve dans les dépôts de silice du Hanovre ou *Kieselguhr* et conserve ses propriétés même lorsqu'elle a été calcinée; il la signale, de même, dans les dépôts de gaize dont nous avons parlé précédemment.

1. Comptes rendus à l'Académie des Sciences, 1885.

La silice hydraulique serait encore la base du calcaire du Theil, car lorsque l'on traite ce calcaire par un acide très étendu, pour dissoudre le carbonate de chaux, qu'on lave et qu'on sèche la silice indissoute pour la purifier et qu'on la mélange avec la chaux pure, cette silice fait prise comme une pouzzolane.

Elle existerait dans les pouzzolanes naturelles, solubles ou insolubles dans l'acide chlorhydrique. Enfin, elle prendrait naissance dans les composés hydrauliques, pendant la cuisson de la silice ou des silicates au contact de la chaux et des alcalis; ce qui est d'ailleurs conforme à la théorie émise par M. Fremy, qui a établi que tout composé hydraulique renferme à la fois de la pouzzolane et de la chaux grasse.

Tout en attribuant à la présence de la silice hydraulique l'unique cause du durcissement définitif des matières hydrauliques, M. Landrin admet cependant que l'aluminate de chaux peut, dans certains cas, contribuer, par sa prise relativement rapide, à faciliter l'action lente et réciproque de la chaux sur la silice hydraulique, en empêchant, au moment de l'immersion, l'eau de pénétrer dans la masse du mortier. C'est par l'absence de l'aluminate de chaux qu'il explique l'insuccès de la chaux du Theil immergée dans les eaux agitées de l'Océan, alors que cette même chaux donne de très bons résultats dans les eaux calmes de la Méditerranée. Mais, ayant été amené par ses expériences à constater que l'aluminate de chaux est susceptible de se dissoudre progressivement dans l'eau, il conteste que ce composé soit autre chose qu'un agent protecteur momentané et puisse concourir au durcissement définitif.

Poursuivant ses travaux, M. Landrin est arrivé à démontrer que le composé qui a pour composition :

| | |
|-----------------|-------|
| Silice. | 44,55 |
| Chaux | 55,45 |
| | <hr/> |
| | 100 » |

et qui correspond à la formule $3\text{SiO}_2, 5\text{CaO}$, composé qui se forme, comme il a été dit précédemment, sous l'action prolongée de la chaux sur la silice hydraulique, se retrouve dans tous les produits de la cuisson des calcaires du Theil et qu'il peut être reproduit directement par la voie sèche dans des conditions identiques à celles qui accompagnent la production de tout bon Portland.

M. Landrin désigne ce composé sous le nom de *pouzzo-portland* pour rappeler à la fois son origine et ses propriétés, et cite, à l'appui de sa démonstration, l'expérience suivante :

Si l'on traite de la chaux du Theil par de l'eau distillée, exempte d'acide carbonique et si l'on agite le mélange pendant 10 à 12 jours à l'aide d'appareils mécaniques pour favoriser la dissolution, on obtient finalement deux parties, l'une soluble, l'autre insoluble, qui, soumises à l'analyse, ont donné les résultats suivants :

| | EAU et acide carbonique | SILICE | OXYDE de fer et alumine | CHAUX | MAGNÉSIE | TOTAL |
|------------------------------|----------------------------------|--------|-------------------------------|-------|----------|-------|
| Perte au rouge. | 4,40 | » » | » » | » » | » » | 4,40 |
| Partie soluble dans l'eau. . | » » | 4,70 | 1,05 | 55,10 | 0,36 | 41,21 |
| Partie insoluble dans l'eau. | » » | 21,70 | 1,95 | 30,06 | 0,68 | 54,39 |
| TOTAUX | 4,40 | 26,40 | 3 » | 65,16 | 1,04 | 100 » |

En examinant la composition de la partie soluble, on voit qu'elle renferme : 1° un très grand excès de chaux libre, qui est susceptible de se carbonater ou de se dissoudre dans l'eau, si les conditions ne sont pas favorables à la production du carbonate de chaux ; 2° de l'aluminate de chaux soluble ; 3° de la silice maintenue en dissolution à la faveur de l'alcali.

Mais la composition de la partie insoluble, interprétée par M. Landrin, est particulièrement intéressante. Si l'on admet, en effet, que l'alumine est combinée à la chaux, sous sa forme la plus basique, ce qui est bien naturel en présence d'un grand excès de chaux, les chiffres précédents peuvent être groupés comme il suit :

| | | | |
|---------------------------|-------|-------------------------|-------|
| Silice. | 21,70 | } Pouzzo-Portland . . . | 48,58 |
| Chaux. | 26,88 | | |
| Alumine et oxyde de fer . | 1,95 | } Aluminate de chaux. . | 5,15 |
| Chaux | 3,18 | | |
| Magnésic. | | | 0,68 |
| Total. | | | 54,39 |

La partie insoluble de la chaux du Theil est donc formée de pouzzo-portland mélangé d'une faible porportion d'aluminate de chaux et de magnésic. De plus, ces insolubles, chauffés au rouge sombre, ont la propriété de faire prise à nouveau et de durcir progressivement, comme le ferait le meilleur portland.

M. Landrin, reprenant de même les analyses de MM. Hervé-Mangon et Durand-Claye sur les grappiers obtenus à l'usine du Theil et qui, comme on le sait, fournissent un excellent ciment de Portland, arrive à grouper les éléments constitutifs de ce produit de la manière suivante :

| | | | |
|---|-------|-------------------------|--------|
| Acide carbonique, eau et produits non dosés | 8,60 | | |
| Silice. | 55,75 | } Pouzzo-Portland . . . | 78,45 |
| Chaux. | 42,70 | | |
| Alumine et oxyde de fer . | 4,55 | } Aluminate de chaux . | 11,95 |
| Chaux. | 7,40 | | |
| Magnésie | | | 1 |
| Total. | | | 100,00 |

La conclusion que l'on peut tirer de ce groupement, c'est que le ciment de

Portland fabriqué avec les grappiers du Theil doit ses propriétés hydrauliques à la forte proportion de pouzzo-portland qui entre dans sa composition.

Enfin, M. Landrin est parvenu à reconstituer, par la voie sèche, un pouzzo-portland artificiel en portant à la température du rouge blanc des mélanges, en proportions convenables, de chaux pure et de silice de diverses natures (silice hydraulique, silex pyromaque et même quartz).

La durée de la cuisson variait suivant la nature de la silice, de telle sorte que la masse fût amenée à consistance fondue, mais non vitrifiée.

Le produit obtenu a présenté les caractères suivants :

1° Sous l'influence du refroidissement, il se délite, dans la plupart des cas, et tombe en poussière;

2° Il est entièrement soluble dans l'acide chlorhydrique;

3° Gâché avec la plus petite quantité d'eau possible et immergé dans l'eau, il fait prise au bout de quinze à seize jours, mais n'acquiert qu'une dureté à peine égale à celle du blanc d'Espagne;

4° Toutefois cette dureté devient comparable à celle des pierres les plus résistantes, si l'on fait passer un courant d'acide carbonique dans l'eau d'immersion, ou si l'on immerge directement le mortier dans de l'eau chargée de ce gaz.

DES PIERRES ARTIFICIELLES A BASE DE CHAUX ET DE CIMENT

En réunissant les grains d'une masse de sable ou de gravier dans une gangue formée par un mortier de chaux ou de ciment, on comprend qu'on puisse obtenir une pâte susceptible d'être moulée et qui, si elle est bien préparée, pourra en durcissant donner un bloc possédant la dureté et la solidité des matériaux naturels adoptés pour les constructions.

L'emploi de pierres de cette nature semble remonter aux temps les plus reculés. D'après M. de la Faye, les parements des pyramides d'Égypte auraient été exécutés en pierres factices : à l'appui de son assertion, il fait remarquer que toutes ces pierres ont exactement les mêmes dimensions, qu'elles ne sont liées par aucun mortier et qu'elles ne présentent aucun lit ; de plus, en analysant des fragments de pierres, il aurait reconnu que l'acide carbonique dosé se trouvait en quantité insuffisante pour saturer la chaux, comme dans les mortiers qui n'ont pas atteint leur état final de stabilité chimique.

Quoi qu'il en soit, il est certain que de semblables pierres peuvent rendre de très grands services dans certaines localités, quand les carrières font défaut, ou quand il est nécessaire de recourir à l'emploi de blocs de dimensions telles qu'on ne pourrait se les procurer dans les carrières en exploitation.

En France, les premiers essais de fabrication de pierres artificielles paraissent avoir été tentés par M. Lebrun, architecte dans les environs de Toulouse. Son procédé se réduisait, en somme, à comprimer dans des moules des mortiers de ciment. Le ciment était obtenu en soumettant à la cuisson, dans des fours à chaux ordinaires, des briquettes composées d'un mélange de caelaire argileux et de coke ou de charbon préalablement réduit en poudre.

Après la cuisson, les briquettes étaient concassées, puis pulvérisées sous des meules, et constituaient la matière qu'il désignait sous le nom d'*hydro*. Cette matière était alors mélangée au sable ordinairement dans la proportion de 1 à 5 et additionnée d'une petite quantité d'eau ($\frac{1}{5}$ du volume environ). On obtenait, par la trituration, une pâte qui était portée immédiatement dans des moules où on la comprimait par la percussion d'un mouton. Différentes constructions, parmi lesquelles une voûte de pont de 10 mètres d'ouverture, ont été exécutées avec succès en employant les pierres factices de M. Lebrun.

M. Vicat, dans son traité de la composition des mortiers, indique les procédés suivis en Piémont pour la fabrication de pierres artificielles avec lesquelles on

construit des chaînes d'angle de maisons, des piles de ponts, des coursiers de moulins, etc. Ces pierres sont constituées par un béton à gangue de mortier hydraulique que l'on moule dans des fosses pratiquées en terre forte. La chaux employée est une chaux hydraulique magnésienne provenant d'un calcaire que l'on trouve dans les environs de Casal ; elle est éteinte par le procédé ordinaire et on la mélange intimement avec un sable bien pur et à grains inégaux ; on y introduit ensuite une certaine quantité de cailloux à peu près d'égale grosseur, mais posés à la main, à mesure que le massif moulé prend, dans la fosse, les dimensions qu'il doit avoir.

Les fosses sont creusées à 1^m,20 environ de profondeur, dans un terrain à l'abri des immersions ; leurs parois humectées sont lissées à la truelle. Quand le massif de béton est confectionné, on le recouvre d'une couche de terre de 50 à 40 centimètres et on le laisse ainsi enfoui pendant deux ou trois ans. Au bout de ce temps, il a acquis, sous l'influence de l'humidité que renferme toute terre fraîche, une dureté telle qu'on peut précipiter les blocs les uns sur les autres de 6 à 7 mètres de haut, sans qu'il en résulte autre chose que des écornures.

BÉTONS AGGLOMÉRÉS

Les bétons agglomérés de M. F. Cogniet sont des mortiers composés de chaux en proportion relativement faible et de matières pulvérulentes de diverses natures. Ces mortiers doivent leurs propriétés à une compression énergique et à un mélange intime des parties constituantes avec le moins d'eau possible.

Par l'élimination de tout excès d'eau, on rend la prise plus prompte et la dessiccation du mortier peut s'opérer sans produire dans la masse cette multitude de vides qui rendent les mortiers ordinaires légers, poreux, gélifs et souvent solubles. De plus, l'absence de tout excès d'eau permet d'obtenir des pâtes de plus grande consistance, susceptibles d'être fortement tassées sous le pilon, et auxquelles on peut donner, même avant la prise, une cohésion bien supérieure à celle des mortiers ordinaires.

Mais, plus l'eau est soigneusement éliminée, plus il devient nécessaire d'opérer un mélange intime des matières par un broyage énergique. Si le mortier n'est pas parfaitement homogène, il se réduit, en effet, en une poudre sèche qu'il n'est pas possible d'agglomérer par le choc, tandis qu'avec un broyage bien fait on peut obtenir des bétons dont le poids par mètre cube dépasse de 400 kilogrammes le poids du mortier ordinaire.

Il faut également réduire au minimum la proportion de chaux entrant dans la composition de ces bétons. Quand les bétons contiennent trop de chaux, ils fuient sous le pilon, la chaux s'extravase et rend l'agglomération impossible. Dès lors, le massif, après la prise, reste poreux, friable et gélif.

Pour obtenir un béton ferme, le volume de chaux ne doit pas dépasser le tiers ou le quart du volume du sable ; on obtient le *maximum de résistance* des bétons agglomérés en réduisant la quantité de chaux au 1/7, au 1/8 et même au 1/10 du volume du sable.

Une aussi faible quantité de chaux peut paraître à priori insuffisante, mais il

faut tenir compte du tassement produit par le choc du pilon qui a pour effet d'enchevêtrer les uns dans les autres les grains de sable de grosseur inégale et de réduire au minimum le vide du sable.

Les conditions que nous venons d'indiquer comme nécessaires à une bonne agglomération ne peuvent être réalisées qu'en apportant des soins spéciaux dans la préparation des bétons agglomérés : Pour réduire au minimum la quantité d'eau contenue dans le mortier, il y a intérêt à employer une chaux préalablement éteinte en poudre; on peut, dans ce cas, limiter à 50 ou 40 litres d'eau par hectolitre de chaux en poudre la quantité nécessaire pour la transformation en pâte. En second lieu, il faut choisir un sable très sec pour le mélanger à la chaux; mais, comme le sable dont on peut disposer est généralement plus ou moins humide et que sa dessiccation offre des difficultés pratiques, il est généralement nécessaire de recourir à l'emploi des matières pouzzolaniques, telles que terre cuite pilée, briques pulvérisées, cendres de houille, etc. M. Coignet recommande l'emploi de ces matières, non pas pour introduire dans les bétons des éléments susceptibles de provoquer des combinaisons chimiques; mais, simplement, pour absorber l'eau qui peut se trouver en excès dans les chaux ou dans les sables.

La quantité de pouzzolane à introduire doit, d'après le rôle qu'on lui attribue, être proportionnelle à l'excédent d'eau contenu dans le mortier. Si le sable est sec, si la chaux est éteinte en poudre au moment de l'emploi, il n'y a aucun inconvénient à réduire la proportion de matières pouzzolaniques au $\frac{1}{20}$ ou même au $\frac{1}{40}$ du volume total.

Dans le cas où une prise plus rapide est nécessaire et où l'on a besoin d'une grande ténacité, il est avantageux de remplacer les pouzzolanes par du ciment de Portland.

Le ciment agit alors de deux manières: comme absorbant et comme chaux éminemment hydraulique, il communique en même temps au béton une plasticité que ne lui donne pas la pouzzolane.

La trituration du mélange exige deux broyages distincts : dans le premier, on met en présence la totalité de la chaux en pâte et de la terre cuite avec une ou deux parties de sable seulement. La chaux, étant alors en quantité notable par rapport aux matières pulvérulentes, les lubrifie complètement et les agglutine sans difficulté. Après cette première opération, on ajoute le complément du sable au mortier ainsi obtenu et l'on continue la trituration. Ce double broyage s'effectue dans des malaxeurs qui ont une certaine analogie avec les tonneaux broyeurs employés pour la fabrication des mortiers ordinaires.

Au fur et à mesure de sa préparation, le béton est porté dans le moule qui doit lui donner sa forme définitive; on l'y étale en couches minces et successives, de 2 centimètres à peine d'épaisseur, que l'on pilonne vigoureusement. L'agglomération, s'exerçant sur un béton ferme et plastique, le durcit et en forme une masse compacte, résistante et tellement dense qu'elle devient sonore sous le choc du pilon.

La cohésion est assez forte pour que l'on puisse retirer le bloc de son moule sans même attendre la prise.

La composition d'un béton aggloméré varie suivant l'usage auquel on le destine. Les proportions employées par M. Coignet sont les suivantes :

1° Pour la maçonnerie ordinaire :

| | |
|------------------------|----------------|
| Sable. | 5 à 7 parties. |
| Terre cuite. | 1 — |
| Chaux en pâte. | 1 — |

2° Pour des maçonneries devant présenter une grande dureté ou une prise rapide :

| | |
|------------------------|----------------|
| Sable. | 5 à 6 parties. |
| Terre cuite | 1 — |
| Chaux en pâte. | 1 — |
| Ciment. | 1/4 à 1/5 — |

La proportion de chaux employée est donc environ le tiers de celle qui entre dans la composition des mortiers ordinaires.

L'emploi des bétons agglomérés a permis de mouler des voûtes de toutes pièces et d'établir des constructions monolithes. On peut également exécuter en béton aggloméré des massifs de machines, des réservoirs ou aqueducs. Ces différentes constructions peuvent acquérir avec le temps une grande dureté quand le béton a été préparé convenablement.

SABLE MORTIER COLORÉ.

Ce produit est destiné à confectionner des enduits ayant toute l'apparence de la pierre de taille ou de la brique. Pour le préparer, on confectionne un mortier composé de sable bien lavé et de chaux grasse éteinte spontanément et blutée. Sur 160 kilogrammes de sable on ajoute 20 kilogrammes ou 38 kilogrammes de chaux suivant que l'on veut obtenir un enduit rugueux ou lisse. On colore le mélange avec de l'ocre jaune ou de l'ocre rouge, suivant que l'on veut imiter la pierre de taille ou la brique. Le mortier est ensuite abandonné à l'air pendant au moins 3 jours et subit un commencement de durcissement, puis on le soumet à une dessiccation rapide et complète en le faisant passer dans un four où il est porté, pendant 3 heures environ, à une température de 150 à 200°. Cette température, insuffisante pour former un silicate, détermine la désagrégation du mortier ; en examinant à la loupe les matières sortant du four, on y distingue trois parties :

- 1° De gros grains de sable que l'on peut séparer par tamisage ;
- 2° Une poussière de chaux ;
- 3° De petites boules de mortier formées de sable fin et de chaux.

Ce produit pulvérulent ou *sable mortier* est mélangé à la chaux grasse dans la proportion de 2 parties de sable mortier contre une partie de chaux en pâte. Le gâchage et la manipulation du mortier ainsi composé s'effectuent comme s'il s'agissait d'un mortier ordinaire.

PIERRES ARTIFICIELLES DE M. RANSOME.

Les pierres artificielles de M. Ransome ont été d'abord confectionnées au moyen d'une pâte formée de sable siliceux ou calcaire et d'une dissolution concentrée de

silicate de soude ou de verre soluble. Cette pâte pouvait bien acquérir une certaine dureté à l'air, mais à l'humidité le silicate se dissolvait.

C'est pour éviter cette attaque par l'eau que M. Ransome eut l'idée de tremper les pierres ainsi préparées dans une dissolution de chlorure de calcium. Par double décomposition, il obtint du silicate de chaux formant une enveloppe impénétrable à l'humidité et du chlorure de sodium susceptible d'être enlevé par un lavage à l'eau.

Enfin, dans son procédé définitif, M. Ransome évite le lavage à l'eau en ajoutant à la solution de silicate de soude ou de potasse : de la silice soluble, du sable, de la chaux ou des matières contenant de la chaux. On forme un mélange intime de ces matières et on met immédiatement en moules. Le silicate insoluble se forme dans la masse entière et on obtient, avec le temps, des pierres qui prennent une grande dureté.

La silice soluble employée par M. Ransome provenait d'un gisement découvert à la base des collines crayeuses de Surrey, près de Farnham ; mais ce minéral est assez rare. Depuis M. Mignot, inventeur d'un ciment siliceux ou application du verre soluble, a indiqué des gisements de silice hydratée en France, particulièrement en Auvergne, au fond d'un lac d'eau douce desséché, et sur une étendue de 150 lieues à la naissance du grès vert dans le contour du littoral de la mer formant autrefois le bassin de Paris.

CIMENTS A BASE D'OXYCHLORURES.

M. Sorel a communiqué en 1855 une note à l'Académie des Sciences sur la formation d'un ciment très solide résultant de l'action d'un chlorure sur l'oxyde de zinc. Ce ciment, qui est un oxychlorure basique de zinc, s'obtient en délayant de l'oxyde de zinc dans du chlorure liquide de la même base ou dans un autre chlorure isomorphe au chlorure de zinc.

On peut aussi remplacer ces chlorures par de l'acide chlorhydrique. Le ciment obtenu est d'autant plus dur que le chlorure est plus concentré et l'oxyde de zinc plus lourd ; il fait prise avec une très grande rapidité.

Plus tard, en 1867, M. Sorel a signalé un autre ciment reposant sur le même principe. C'est un oxychlorure de magnésium basique et hydraté qu'il préparait en gâchant de la magnésie avec une solution de chlorure de magnésium. On obtient un ciment très solide en employant du chlorure marquant de 20 à 50° à l'aréomètre de Baumé.

On peut également, dans ce nouveau ciment, remplacer, en tout ou en partie, le chlorure de magnésium par plusieurs chlorures ou sels ayant pour bases des métaux compris dans les trois premières sections de la classification de Thénard.

Le nouveau ciment magnésien est d'un blanc éclatant, il se moule comme le plâtre et acquiert une très grande dureté. Il possède, en outre, à un très haut degré, la propriété agglutinative. Une partie de magnésie peut agglomérer, en formant des blocs durs, jusqu'à 20 parties de sables, de calcaires et autres matières inertes.

On peut obtenir ce ciment à un prix relativement peu élevé, en employant de la

magnésie extraite des eaux mères des marais salants ou extraite directement de l'eau de la mer d'après les procédés industriels indiqués par M. Schloesing¹.

L'emploi du ciment magnésien de M. Sorel est exploité sur une grande échelle en Amérique par la *Union stone Company*, de Boston. On y prépare la magnésie en calcinant, à une température modérée, pendant 24 heures, du carbonate de magnésie ou magnésite qui se trouve en abondance dans la Pensylvanie, le Maryland et la Californie; on rencontre également, en Grèce, des gisements importants de cette roche, qui, au sortir de la carrière, est d'un blanc grisâtre et contient 95 pour 100 environ de carbonate de magnésie mélangé à 5 pour 100 de matières étrangères (argile et silice).

Après calcination, on réduit les fragments de cette roche en poudre impalpable et on la mélange à sec avec du marbre pulvérisé, de l'ardoise, de la poudre d'os ou autres matières analogues. Une proportion de 10 pour 100 de magnésie est suffisante pour obtenir des blocs très résistants.

Le mélange est ensuite humecté avec une dissolution de chlorure de magnésium, marquant de 15° à 30° à l'aréomètre de Baumé, en quantité suffisante pour faire une pâte plastique. Après une bonne trituration de la pâte, on la comprime dans des moules de forme convenable. Au bout de 8 jours on peut démouler et les blocs ont déjà acquis une dureté suffisante pour être immédiatement employés.

Des expériences faites à l'arsenal de Boston ont donné les chiffres suivants pour la résistance à l'écrasement de divers échantillons :

Échantillons n° 1 — 350 kilogrammes par centimètre carré.

| | | | | | |
|---|------|---|------|---|---|
| — | n° 2 | — | 578 | — | — |
| — | n° 3 | — | 1078 | — | — |
| — | n° 4 | — | 367 | — | — |

La résistance de l'échantillon n° 3 serait, d'après ces résultats, comparable à celle du granit.

En France, ce ciment, mélangé à la poudre d'émeri, sert à fabriquer ces meules artificielles dont l'emploi est aujourd'hui très répandu dans les ateliers de construction pour le travail des métaux.

1. Comptes rendus à l'Académie des sciences, 1881.

DU PLÂTRE

Le plâtre est du sulfate de chaux naturel auquel on a enlevé l'eau de carrière et l'eau de combinaison par une cuisson préalable. On donne aussi le nom de plâtre à la pierre même, avant sa cuisson ; de là, les désignations de plâtre cuit et de plâtre cru, pour distinguer ces deux états qui correspondent, en somme, à des propriétés très différentes.

Gisements. — Le sulfate de chaux est très répandu dans la nature, tout en l'étant moins cependant que le carbonate. On le rencontre soit à l'état anhydre, soit à l'état hydraté.

A l'état anhydre, il constitue la roche appelée *anhydrite* ou *karsténite* et se présente sous un aspect plus brillant que le marbre, avec une dureté plus grande que le sulfate de chaux hydraté.

Il est formé d'une masse cristalline qui, par le clivage, donne des prismes rectangulaires droits.

Les gisements de cette roche sont assez rares et ne se rencontrent guère que dans les terrains intermédiaires. L'anhydrite est, d'ailleurs, sans applications dans l'industrie.

Le sulfate de chaux hydraté a pour formule $(\text{CaO}, \text{SO}_3, 2\text{H}_2\text{O})$ et se compose de 52,60 pour 100 de chaux, de 46,50 pour 100 d'acide sulfurique et de 20,90 pour 100 d'eau. Sous cet état, il constitue la pierre désignée sous le nom de *gypse* ou *pierre à plâtre* dont les gisements sont très nombreux.

On le rencontre, sous la forme de veinules, ou en cristaux isolés, à peu près dans toutes les formations, dans certains filons, dans les couches de houille ou de lignites et dans plusieurs dépôts de minerais de fer. Ces cristaux isolés ne renferment que des traces de corps étrangers.

Le gypse se présente aussi en masses puissantes, soit dans les terrains secondaires, où il se trouve intercalé avec des couches de calcaire, soit dans les terrains tertiaires, comme dans les environs de Paris, sous la forme de dépôts plus ou moins mélangés à des marnes.

Le gypse est quelquefois incolore ; mais, le plus souvent, il présente une coloration due à la présence de matières étrangères ; l'argile lui donne une teinte grisâtre ou bleuâtre, tandis que le fer le colore en jaune, en rouge ou en brun.

On distingue plusieurs variétés de gypse :

Le *gypse filamenteux*, qui affecte la forme d'une masse cristalline confuse.

Le *sélénite*, ou *gypse feuilleté*, qui est formé de cristaux volumineux pouvant se diviser en lames minces et brillantes.

Le *gypse en fer de lance*, ainsi nommé en raison de la forme qu'affecte le

groupement des cristaux qui peuvent également se diviser en feuilles. Soumises à la cuisson, ces trois variétés fournissent un plâtre de choix que l'on réserve pour les moulages délicats et les ouvrages de sculpture.

L'*alabastrite* ou *faux albâtre* est une variété compacte, à grain fin, à demi transparente; elle présente quelque analogie avec l'albâtre calcaire, mais sans en avoir la solidité et la dureté; à cause de son aspect, elle est néanmoins recherchée pour certains travaux artistiques.

Enfin, le *sulfate de chaux calcarifère*, ou pierre à plâtre ordinaire, qui se rencontre en abondance dans les environs de Paris et qui contient jusqu'à 12 pour 100 de carbonate de chaux ainsi qu'une certaine proportion d'argile et de sable.

Les bancs de gypse d'une même carrière offrent des différences assez grandes, au point de vue de la qualité du plâtre qu'ils sont susceptibles de fournir. Aussi, le plâtrier doit-il apporter tous ses soins à mélanger les diverses sortes de pierres pour obtenir un plâtre d'une qualité uniforme.

Dans les carrières des environs de Paris on distingue les bancs suivants :

1° Le *souchet*, placé sous le ciel de la carrière, sur une épaisseur de 0^m,65 environ; ce banc est tendre et ne fournit qu'un plâtre de médiocre qualité; il est employé ordinairement à l'état de poudre pour former la couche supérieure qui recouvre la charge soumise à la cuisson;

2° Le *bousineux*, placé immédiatement au-dessous, est un banc de 0^m,40 de hauteur qui fournit aussi un plâtre de qualité inférieure;

3° Le *toisé*, le *petit dur* et le *gros dur*, dont les hauteurs varient de 0^m,50 à 0^m,45 et qui donnent du plâtre d'excellente qualité;

4° La *ceinture*, le *gros gris* et le *petit glandeux*, qui ont à peu près la même importance, mais ne peuvent donner que du plâtre très médiocre;

5° Le *gros glandeux*, la *brioche* et le *banc rouge*, qui produisent le plâtre le plus pur; il aurait même trop d'énergie s'il ne se trouvait mélangé au plâtre provenant des autres bancs;

6° Le *gros banc*, qui a près d'un mètre de hauteur et donne un plâtre de qualité moyenne. Ce banc repose ordinairement sur un septième banc de pierre très dure appelé *sous-pied*, qui fournit une très bonne pierre à plâtre, mais qui, en raison de la profondeur où il se trouve, présente souvent d'assez grandes difficultés d'exploitation.

L'une des meilleures pierres à plâtre des environs de Paris est celle qui est désignée sous le nom de *pied noir*. Elle est dure et très résistante à la cuisson.

Une autre variété, qui fournit également de très bon plâtre pour le moulage et qui est en même temps très facile à cuire, est celle qu'on exploite dans les environs de Paris sous le nom de *banc de mouton*. Cette pierre d'une texture moins serrée perd facilement l'eau de cristallisation.

PROPRIÉTÉS DU SULFATE DE CHAUX.

Le sulfate de chaux a pour densité 2,31.

Il est un peu soluble dans l'eau. A la température de 15°, une partie de sulfate, supposé anhydre, se dissout dans 490 parties d'eau. Cette solubilité est légèrement

variable avec la température et présente un maximum aux environs de 35°, ainsi que le montrent les chiffres suivants, obtenus par M. Marignac ¹ :

| | | | |
|---------------|-----|---------------|-----|
| 0° | 525 | 41° | 468 |
| 18° | 488 | 55° | 474 |
| 24° | 479 | 72° | 495 |
| 52° | 470 | 86° | 528 |
| 58° | 466 | 99° | 571 |

Quand on veut déterminer le coefficient de solubilité de ce sel, il faut se mettre en garde contre la formation de dissolutions sursaturées, qui ont une tendance à se produire dans des circonstances variées :

Par l'évaporation à chaud, sans ébullition, par exemple, M. Marignac a pu obtenir une dissolution retenant 1/506 de sel.

Par l'évaporation à la température ordinaire, dans le vide, la concentration a pu atteindre 1/162.

On peut obtenir des dissolutions encore plus concentrées, en faisant dissoudre, dans de l'acide sulfurique étendu, du carbonate de chaux en poudre fine. Dans un essai de ce genre, la liqueur filtrée, après un quart d'heure d'agitation, et parfaitement neutre, tenait 1/114 de sulfate de chaux. Au bout de 24 heures, elle en retenait encore 1/515.

Des résultats analogues se produisent quand on fait dissoudre dans l'eau du sulfate de chaux anhydre provenant de la cuisson du gypse ; mais ils varient beaucoup suivant le degré de calcination auquel il a été soumis : si le gypse a été desséché à 155 ou 140°, sa dissolution est immédiate ; après filtration au bout de 10 minutes d'agitation, elle contient 1/110 de sel. Mais, s'il a été chauffé au rouge, sa dissolution devient beaucoup plus lente ; au bout de 24 heures, la proportion dissoute varie de 1/556 à 1,598, suivant l'intensité de la calcination, proportion inférieure à celle qui correspond au sel hydraté ; toutefois, il continue à se dissoudre jusqu'à ce qu'une portion du sel, s'étant hydraté, détermine une diminution de l'état de sursaturation.

Dans diverses expériences, faites par M. Marignac, le maximum de concentration atteint 1/372 ; 1/544 ; 1,525, au bout de 10 à 50 jours.

L'état de sursaturation est très persistant lorsque l'excès de sel dissous n'est pas très considérable. Nous verrons plus loin comment M. Le Châtelier a mis à profit la formation de ces dissolutions sursaturées pour expliquer le phénomène de la prise du plâtre.

Le sulfate de chaux est complètement insoluble dans l'alcool.

Les deux équivalents d'eau combinés dans le gypse peuvent être chassés par la chaleur à une température inférieure à 200°.

Lorsqu'on chauffe graduellement des fragments de pierre à plâtre, l'eau commence à se dégager, en partie, à une température voisine de son point d'ébullition. Si la matière est en vase clos, la déshydratation est un peu retardée et ne commence qu'à une température légèrement supérieure à 100° ; si, au contraire, la masse est traversée par un courant gazeux, la déshydratation s'effectue partiellement au-des-

sous de 100°. Du gypse, exposé dans un courant d'air, peut perdre les trois quarts de l'eau qu'il renferme, soit 15,7 pour 100 de son poids entre 90 et 96°; le dégagement de vapeur s'arrête ensuite et la déshydratation complète ne s'opère qu'entre 105° et 170°.

D'après M. Landrin, le plâtre cuit à 140° retient toujours 7 à 8 pour 100 d'eau.

Les récentes expériences de M. Le Châtelier sur la cuisson du plâtre mettent en évidence l'existence de deux temps distincts dans la marche de la déshydratation du gypse¹.

Ces expériences, faciles à reproduire, consistent à chauffer progressivement une petite quantité de gypse pulvérisé dans un tube de verre placé lui-même dans un bain de paraffine et à noter, de cinq en cinq minutes, la température indiquée par le thermomètre plongé au milieu du gypse. En construisant une courbe ayant pour abscisses les temps et pour ordonnées les degrés de température, on reconnaît immédiatement que cette courbe présente deux parties horizontales assez nettement accusées : la température, après s'être élevée rapidement jusqu'à 110°, monte plus lentement de 110° à 120°, reste très longtemps stationnaire entre 120° et 150° et reprend une marche ascensionnelle plus rapide entre 150° et 140°. Un second temps d'arrêt analogue au précédent, mais moins important, se produit entre 160° et 170°. Ces deux temps d'arrêt s'expliquent par l'absorption de chaleur qui accompagne l'élimination de l'eau et indiquent l'existence de deux hydrates ayant des températures de décomposition différentes. Le premier hydrate $\text{SO}_5, \text{CaO} + 2\text{H}_2\text{O}$ perd d'abord la majeure partie de son eau pour former un second hydrate, lequel se décompose vers 170° pour donner le plâtre anhydre.

M. Le Châtelier a établi la composition de l'hydrate intermédiaire en chauffant pendant quelque temps 10 grammes de gypse à la température de 155°, qui est intermédiaire entre celles de décomposition des deux hydrates; il a constaté que la perte de poids tendait vers une limite fixe de 1^{er},56 qui correspond très exactement à 1^{er},5 d'eau; d'où il résulte que l'hydrate intermédiaire renfermant 6,2 pour 100 d'eau aurait pour formule $\text{SO}_5, \text{CaO} + 0,5\text{H}_2\text{O}$. Le plâtre du commerce qui renferme en moyenne 7 pour 100 d'eau est donc presque exclusivement formé par cet hydrate.

Si l'on élève la température au delà de 170°, il ne se produit aucune modification sensible tant qu'on ne dépasse pas 200 à 225°. Mais, à une température plus élevée, le plâtre commence à perdre une partie de ses propriétés essentielles. Il n'absorbe plus l'eau qu'avec beaucoup de difficultés et de lenteur, et chauffé au delà de 400°, il n'est plus susceptible de se gâcher, ni de faire prise avec l'eau; sous ce rapport, il se comporte comme l'anhydrite qui, réduite en poudre impalpable, ne commence à s'hydrater qu'au bout de plusieurs jours.

En continuant à élever la température, la matière se fritte; puis, à la chaleur rouge, elle entre en fusion et se solidifie par le refroidissement en formant une masse cristalline dont les clivages sont les mêmes que ceux de l'anhydrite.

Le sulfate de chaux est indécomposable par la chaleur, mais il se transforme en sulfure de calcium au contact du charbon, ou sous l'influence de matières organiques en décomposition. Ce sulfure, se décomposant ensuite par l'action de l'acide

1. Comptes rendus à l'Académie des sciences. Juin 1883.

carbonique et de l'eau, donne naissance à un dégagement d'acide sulfhydrique. On peut expliquer ainsi la présence de l'acide sulfhydrique dans certaines eaux qui contenaient, à l'origine, du sulfate de chaux. Une décomposition semblable peut s'opérer dans le sol de certaines grandes villes, quand il s'y trouve, comme dans le sol de Paris, une grande quantité de sulfate de chaux.

Le sulfate de chaux hydraté possède une certaine dureté; après sa déshydratation, il devient pulvérulent et farineux. Lorsqu'on mélange, avec un excès d'eau, du plâtre cuit, en poudre, complètement ou partiellement déshydraté, à une température modérée, le sulfate de chaux se prend rapidement en masse en se combinant avec 2 équivalents d'eau. Cette prise est accompagnée d'un dégagement de chaleur très notable et produit un gonflement d'environ 1 pour 100. La masse, après dessiccation, reprend la dureté de la pierre. C'est à cette propriété qu'est dû l'emploi du plâtre pour les moulages et dans les constructions.

ANALYSE D'UNE PIERRE A PLATRE.

Les dépôts de gypse, exploités comme pierre à plâtre, contiennent fréquemment le sulfate de chaux mélangé d'une manière plus ou moins intime avec de l'argile ferrugineuse, du sable quartzéux et du carbonate de chaux : ils sont traversés par des veinules de sulfate de strontiane ou de baryte, disséminées trop irrégulièrement pour qu'il soit possible d'avoir un échantillon représentant bien exactement la composition moyenne des bancs exploités. Il convient, d'ailleurs, de remarquer que ces sulfates se comportent comme des matières inertes dans la prise du plâtre et que, par conséquent, on peut se contenter, en général, d'une évaluation approximative pour apprécier la qualité du plâtre.

D'après Rivot, l'analyse d'un échantillon de pierre à plâtre exige les opérations suivantes :

1° *Dessiccation* à la température de 100° dans une étuve, ou à la température ordinaire sous la cloche d'une machine pneumatique ; la perte de poids donne l'eau hygrométrique.

2° *Calcination* au rouge vif ; cette opération a pour but d'indiquer par différence l'eau combinée avec l'argile et avec l'oxyde de fer, l'eau de cristallisation du sulfate de chaux et l'acide carbonique combinée à la chaux, mais elle est assez délicate : d'un côté, en effet, si la calcination est un peu prolongée, il est à craindre que le sable quartzéux et l'argile, en agissant sur le sulfate de chaux, ne chassent l'acide sulfurique ; d'un autre côté, si la chaleur a été trop modérée, ou ne s'est pas exercée pendant assez longtemps, on n'est pas certain d'avoir expulsé la totalité de l'eau et de l'acide carbonique.

3° *Dosage de l'acide carbonique*. — On traite par l'acide chlorhydrique 2 ou 3 grammes prélevés sur l'échantillon et on recueille l'acide carbonique dans une dissolution ammoniacale de chlorure de baryum.

4^e Détermination du sulfate de chaux. — On met, dans une fiole d'environ 3 litres de capacité et presque entièrement remplie d'eau, 2 grammes de gypse parfaitement porphyrisé ; on laisse le liquide agir pendant deux jours au moins, en ayant soin d'agiter fréquemment. On décante et on renouvelle le liquide deux fois de suite en laissant 24 heures d'intervalle entre 2 décantations successives.

On peut alors considérer le sulfate de chaux comme entièrement dissous ; les liquours décantés et filtrés sont réunies et leur volume total est mesuré avec exactitude. On en prélève une certaine fraction sur laquelle on effectue le dosage de l'acide sulfurique en le précipitant à l'état de sulfate de baryte ; le reste de la dissolution est évaporé à sec et on pèse le résidu après l'avoir chauffé au rouge sombre. Son poids permet de calculer la proportion du sulfate de chaux dissous par l'eau ; la comparaison de ce résultat avec celui qui est déduit du dosage de l'acide sulfurique indique la présence ou l'absence de tout sel soluble autre que le sulfate de chaux.

5^e Traitement de la partie insoluble. — La matière que l'eau n'a pas dissoute contient le sable quartzeux, l'argile, l'oxyde de fer, le carbonate de chaux et accidentellement les sulfates de strontiane et de baryte. On la traite par l'acide chlorhydrique très étendu, de façon à ne dissoudre que l'oxyde de fer et le carbonate de chaux sans attaquer l'argile. On fait alors arriver, dans la liqueur acide décantée, un courant d'hydrogène sulfuré, et on sature peu à peu l'acide par l'ammoniaque, en ayant soin de maintenir toujours l'hydrogène sulfuré en excès. Dans ces conditions, le fer seul se précipite à l'état de sulfure et la chaux reste dissoute en entier. Après avoir filtré et lavé le sulfure de fer, on le transforme en peroxyde dont on détermine le poids ; puis, dans la liqueur sulfhydrique, on précipite la chaux par l'oxalate d'ammoniaque et on le dose à l'état de sulfate ou à l'état caustique.

Si la dissolution chlorhydrique a attaqué l'argile, ce que l'on constate à l'apparition de petits flocons gélatineux de silice, ou simplement à la lenteur avec laquelle la liqueur acide passe à travers le filtre, il est prudent, dans ce cas, de recommencer toutes les opérations en traitant une nouvelle partie du minéral d'abord par l'eau, puis par l'acide nitrique. On évapore à sec et on reprend par l'acide nitrique ; on a ainsi dans la liqueur l'oxyde de fer, une partie de l'alumine de l'argile et la chaux ; on décante, on évapore de nouveau à sec et on continue à chauffer le résidu à 180° tant qu'il se dégage des vapeurs rutilantes. La matière obtenue ainsi est traitée par une dissolution saturée de nitrate d'ammoniaque à 100° ; la chaux seule passe dans la dissolution ; l'alumine et l'oxyde de fer restent insolubles. On les pèse après calcination et on en fait la séparation si on le juge nécessaire. La chaux est ensuite précipitée par l'oxalate d'ammoniaque comme précédemment.

Partie insoluble dans les acides. — Dans les 2 cas, la matière insoluble dans les acides chlorhydrique ou nitrique renferme du quartz, de l'argile et les sulfates de strontiane et de baryte.

L'examen à la loupe suffit pour faire connaître approximativement si le sable quartzeux est en proportion plus grande que l'argile ; quant aux sulfates, on les évalue de la manière suivante :

La matière porphyrisée est traitée par une dissolution concentrée de carbonate de

soude et échauffée à 100° environ ; les sulfates sont transformés en carbonates, qu'on dissout par l'acide chlorhydrique très étendu, après avoir lavé à l'eau bouillante la matière insoluble dans la dissolution alcaline. On précipite ensuite la baryte et la strontiane de la liqueur chlorhydrique par l'acide sulfurique versé goutte à goutte. On pèse les sulfates et on cherche à reconnaître la nature et la proportion des deux bases : baryte et strontiane.

D'après ce qui précède, on voit que l'analyse d'une pierre à plâtre est longue et même un peu délicate ; on doit ajouter que les résultats obtenus sont rarement suffisants pour indiquer la qualité du plâtre au point de vue de son emploi dans les constructions. Il est préférable, dans la plupart des cas, de recourir à des essais directs, en soumettant à la cuisson quelques fragments de la pierre jusqu'à évaporation complète de l'eau et en observant la rapidité de la prise de la poudre ainsi obtenue, quand on la gâche avec l'eau.

CUISON DU PLÂTRE.

Le procédé de cuisson le plus ancien, qui est encore le plus souvent employé pour le plâtre grossier, est celui qui consiste à effectuer la cuisson sous un simple hangar fermé latéralement par des murs, au moins sur trois côtés. On construit, sur le sol du hangar, avec les plus gros fragments de pierre à plâtre, une série de petites voûtes sur lesquelles on charge ensuite, par couches régulières, des morceaux de grosseur décroissante, entre lesquels on a soin de réserver des interstices convenables. A la partie supérieure, se trouvent ainsi les fragments les plus petits que l'on recouvre avec les débris et la poussière de plâtre qui se forment pendant l'exploitation.

On allume, alors, sous chaque voûte, un feu de bois que l'on entretient modérément, de manière à maintenir la température aussi égale que possible dans tous les points de la masse. La flamme, en circulant entre les fragments de plâtre, enlève à ceux-ci leur eau de carrière et leur eau de combinaison sous forme de vapeurs qui s'échappent avec la fumée par les intervalles des tuiles de la toiture, lesquelles sont simplement posées sur un lattis à claire-voie.

Lorsque l'on veut remplacer le bois par le charbon de terre pour la cuisson, au lieu de faire reposer la charge de plâtre directement sur le sol, il devient nécessaire de la supporter par des voûtes maçonnées en briques qui sont percées de trous et font l'office de grilles. Les figures 28 et 29 représentent cette disposition.

Le feu est entretenu jusqu'au moment où les pierres placées à la base commencent à rougir, c'est-à-dire, en moyenne, pendant douze heures.

Ce procédé ne permet pas naturellement d'obtenir une cuisson uniforme dans toute la masse. Les fragments qui forment les couches supérieures ne sont soumis qu'à une chaleur insuffisante, tandis qu'à la base les pierres sont brûlées et donnent un plâtre inerte. De plus, à cette température élevée, et par suite du contact avec le combustible, une partie du sulfate de chaux est convertie en sulfure de calcium, qui est éminemment défavorable à la prise ultérieure du plâtre. C'est à la présence de ce sulfure qu'est due l'odeur d'hydrogène sulfuré qui se manifeste ordinairement pendant l'opération du gâchage.

Cuisson dans des fours. — Le procédé de cuisson que nous venons d'indiquer

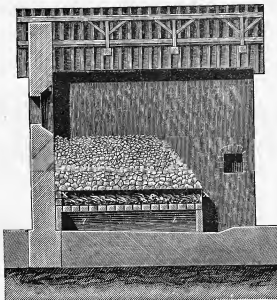


Fig. 28.

n'exige qu'une installation simple et peu coûteuse, mais il faut reconnaître que la

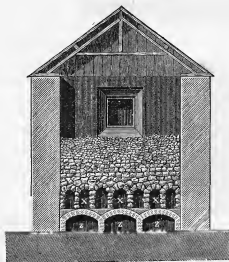


Fig. 29.

marche régulière des feux est assez difficile à obtenir et que le combustible se

trouve employé dans des conditions peu économiques. Aussi, dans les exploitations importantes dont les produits ont des débouchés constants et assurés, il peut être avantageux de recourir à la cuisson du plâtre dans des fours analogues aux fours employés pour la calcination de la chaux.

Four de Montmartre. — Une disposition de four assez répandue dans les environs de Paris et utilisée, en particulier, pour la cuisson du plâtre des carrières de Montmartre, est le four représenté sur la figure 6 (planche III).

La cuve a une forme ovoïde et présente, à la partie inférieure, une grille E surmontée d'une voûte en briques réfractaires percée d'ouvertures pour le passage des flammes. On peut brûler sur la grille du bois ou de la houille à longue flamme. Le chargement de la pierre à plâtre s'effectue par le haut et le déchargement du plâtre

cuit par une porte latérale L dont le seuil est établi au niveau de l'extrados de la voûte.

La conduite du feu est, dans ce cas, plus facile et les déperditions de chaleur sont moins grandes que dans la cuisson sous des hangars; mais les mêmes inconvénients subsistent au point de vue de l'irrégularité de cuisson des différentes couches de pierres.

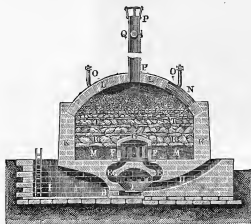


Fig. 30.



Fig. 31.

Four Dumesnil. — Dans la construction du four de M. Dumesnil, de Mareuil-lez-Meaux (fig. 30 et 31), on s'est attaché à obtenir une plus grande régularité de cuisson en donnant au four une grande section et en répartissant aussi régulièrement que possible la chaleur sur toute l'étendue de sa base.

A cet effet, sous la sole, se trouve un foyer D dont les flammes, en passant par les conduits courbes E, pénètrent dans la chambre à feu G. Les gaz chauds passent ensuite par douze ouvertures FF, et sont

amenés jusqu'à la circonférence du four au moyen de carneaux rayonnants MM. construits avec des morceaux de gypse convenablement choisis.

Au-dessus de ces carneaux et jusqu'aux reins de la voûte, sont disposées les différentes couches de pierres composées de morceaux dont la grosseur va en dimi-

nuant graduellement. Les gaz chauds, amenés par les carneaux M, traversent successivement ces couches en passant dans les interstices convenablement ménagés entre les pierres et arrivent ainsi jusqu'à la voûte pour s'échapper par la cheminée centrale P, munie d'un papillon Q, et par les cheminées latérales O.

Vers la fin de l'opération, on recouvre la charge d'une couche de menu gypse et de poussières que l'on introduit par une ouverture N ménagée dans la voûte. Sur la paroi latérale du four est pratiquée une porte qui sert à l'introduction des pierres formant les premières couches et à l'extraction du plâtre euit.

L'introduction des fagots destinés à l'alimentation du foyer se fait par le conduit H; sur le côté opposé à ce conduit est une fosse qui donne accès au cendrier B.

Avec un diamètre de 6 mètres et une hauteur de 4 mètres à la clef, ce four contient 55 mètres cubes de plâtre. Pendant les premières heures, on modère le feu, de manière à élever graduellement la température; la cuisson est complète au bout de douze heures. A ce moment, on éteint le feu, on recouvre la charge de 5 à 6 mètres cubes de menu gypse et l'on ferme tous les orifices. La chaleur de la masse est suffisante pour cuire ce complément de la charge primitive.

Ce four est plus économique que le précédent au point de vue de l'emploi du combustible et donne des produits plus uniformes, mais sa construction exige une dépense relativement élevée.

Cuisson au moyen de gaz combustibles. — Tous les fours que nous venons de décrire exigent l'emploi de combustibles à longue flamme qui sont souvent d'un prix élevé. Pour utiliser des combustibles de qualité inférieure ou à courte flamme, on a songé à distiller préalablement ces combustibles, comme on le fait dans plusieurs industries, et à brûler ensuite les gaz provenant de la distillation au moment de leur introduction dans le four.

Des expériences basées sur ce principe ont été faites par M. Beaufumé, aux carrières de Vaujours et de Pantin, et ont donné des résultats assez satisfaisants. Néanmoins, jusqu'ici, l'application de ce système ne s'est point répandue.

On a également eu l'idée d'utiliser, pour la cuisson du plâtre, la chaleur perdue des fours à coke.

Les fig. 52 et 53 représentent une disposition qui a été adoptée en vue de cette utilisation.

Les gaz combustibles sortant des fours à coke A, A, A, sont dirigés par des conduits à la partie inférieure des chambres B, B, B, placées en arrière à un niveau un peu plus élevé, et successivement remplies de plâtre cru en morceaux. Au sortir des chambres, les gaz passent dans deux carneaux supérieurs qui les conduisent dans une cheminée latérale.

La préparation du coke dans les trois fours y est conduite de manière à se trouver à une époque différente dans chacun d'eux, le plâtre se trouve ainsi sans cesse exposé à une température moyenne et constante. Pour que la marche de la cuisson ne subisse aucun arrêt, il y a toujours une chambre en déchargement et une autre en chargement pendant que la cuisson s'opère dans une troisième chambre.

Cuisson du plâtre par la vapeur d'eau surchauffée. — M. Violette a essayé et indiqué différentes applications de la vapeur d'eau surchauffée, comme : la carboni-

sation du bois en vase clos, la cuisson du pain, la calcination de la chaux, la distillation du mercure et, en particulier, la cuisson du plâtre. Dans ces diverses applications, la vapeur d'eau surchauffée n'agit pas seulement comme véhicule de chaleur, mais encore comme corps très avide d'eau, et, dans certains cas, comme fluide facilitant l'entraînement de l'acide carbonique ou autres gaz susceptibles d'être séparés par distillation.

Fig. 52.

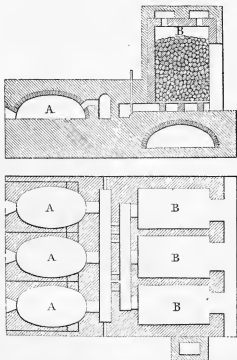


Fig. 53.

L'emploi de la vapeur d'eau surchauffée pour la cuisson du plâtre présente comme avantages : 1° Une plus grande régularité de la cuisson dans les différentes parties du four; 2° la production d'un plâtre d'une blancheur éclatante, par suite de l'absence de tout contact entre la pierre à plâtre et le combustible ou la fumée; 3° la possibilité d'emploi de combustibles quelconques pour produire la vapeur nécessaire à l'alimentation du four.

L'installation se compose, en principe, d'un générateur ou chaudière à vapeur ordinaire, d'un serpentin en métal et de deux chambres en maçonnerie contenant la pierre à plâtre. La vapeur, produite dans le générateur, se surchauffe dans le serpentin jusqu'à la température de 200° environ, pénètre dans la première chambre où, en vertu de sa pression, elle se répand également dans toutes les parties de la

masse, passe dans la chambre voisine et s'échappe enfin dans l'air en entraînant toute l'humidité du plâtre dont elle peut se charger en raison de sa température élevée.

La vapeur, à son entrée dans la seconde chambre, n'a plus la température suffisante pour opérer la déshydratation complète du plâtre et ne fait qu'échauffer la pierre et la préparer pour la cuisson que l'on achève ensuite en y amenant la vapeur sortant de la chaudière.

D'après les essais faits par M. Violette, pour convertir 150 kilogrammes de gypse mélangé, en plâtre de qualité équivalente au plâtre ordinaire de maçon, il a suffi d'entretenir, pendant 3 heures, un courant de vapeur d'eau surchauffée à raison de 20 kilogrammes par heure, soit une dépense de 60 kilogrammes de vapeur d'eau. D'où il résulterait une économie assez sensible dans l'emploi du combustible, par rapport à la cuisson ordinaire.

Fours continus. — Plusieurs dispositions de four basées sur une alimentation continue ont été proposées en vue d'obtenir à la fois une plus grande uniformité dans la cuisson et une économie de combustible en diminuant la chaleur perdue par les maçonneries.

Parmi les dispositions de ce genre, nous citerons le four à plâtre continu de M. Ramdohr. Il se compose d'une ou de plusieurs cornues cylindriques en fonte, à axe vertical. La section est elliptique et mesure 1 mètre environ suivant son grand axe et 0^m,23 à 0^m,32 suivant son petit axe. Chaque cornue est formée de plusieurs portions de cylindre réunies par des manchons cimentés; elle est ouverte à la partie supérieure pour le chargement et n'est soumise à l'action de la chaleur que sur les 2/3 de sa hauteur; la partie inférieure, qui mesure environ 1 mètre de hauteur, sert à refroidir le gypse avant la sortie du four.

Le défournement se fait par trois ouvertures circulaires pratiquées à la base et fermées par des soupapes coniques que l'on met en mouvement au moyen d'excentriques calés sur un même arbre et actionnés au moyen d'une manivelle et d'un engrenage. Chaque cornue peut donner, en 24 heures, un rendement de 56 hectolitres de plâtre cuit, avec une consommation de 600 kilogrammes de lignite ou de 200 kilogrammes de houille.

La continuité de la cuisson peut être également réalisée au moyen des fours annulaires du système Licht et Hofmann, dont nous avons déjà parlé à propos de la calcination de la chaux. Mais ces fours, donnant lieu à des dépenses de construction relativement considérables, ne pourraient convenir pour de petites installations.

Enfin, nous nous bornerons à mentionner ici quelques dispositifs qui exigent l'emploi d'une certaine force motrice, tels que : les cylindres mobiles, au-dessus d'un foyer, analogues aux appareils de torréfaction du tabac (Rolland), les cylindres fixes à l'intérieur desquels tourne une hélice, qui, dans son mouvement, pousse lentement le plâtre d'une extrémité à l'autre (Covlet, Pshaw); le faisceau tubulaire légèrement incliné et relié solidairement à un arbre animé d'un mouvement de rotation (Hanotin), etc.

Avec ces appareils, on produit un plâtre exempt de toutes les impuretés qui peuvent résulter du contact avec le combustible; le degré de cuisson peut être réglé très facilement et l'on peut obtenir des produits parfaitement homogènes et de qua-

lité supérieure. A côté de ces avantages, il convient de tenir compte des complications inhérentes à l'emploi de ces appareils, de la nécessité d'installer des moteurs pour les mettre en marche. C'est à ces sujétions qu'il faut attribuer, en grande partie, le peu de succès qu'ont obtenu ces appareils dans la pratique.

Les plâtriers paraissent s'en être généralement tenus aux procédés de cuisson les plus simples.

Ces procédés, comme nous l'avons dit, ne peuvent fournir qu'un plâtre très irrégulièrement cuit, mais ce défaut est sans grand inconvénient pour les plâtres communs destinés aux constructions, et c'est pourquoi les fabricants ne se sont pas préoccupés d'améliorer la qualité, en recourant à des procédés plus perfectionnés qui les auraient conduits à faire de grands frais de première installation.

Cuisson du plâtre destiné à l'agriculture. — Lorsque le plâtre est euit spécialement en vue de son emploi comme amendement du sol, il n'y a aucun inconvénient à ce qu'il soit mis directement en contact avec le combustible et qu'il soit même mélangé de cendres. On peut effectuer la cuisson dans des fours à chaux ordinaires en alternant les couches de pierre et de combustible et sans qu'il soit besoin de recourir à l'emploi de combustibles à longue flamme.

Cuisson du plâtre fin. — Le plâtre des mouleurs, ou plâtre fin, doit, au contraire, être bien blanc et cuit avec soin. On choisit, dans la carrière, pour cette destination, les pierres susceptibles de fournir le plâtre de meilleure qualité; ces pierres, que l'on désigne sous le nom de *roussette*, sont réduites en poudre avant d'être introduites dans les fours de cuisson qui sont ordinairement de simples fours dits à *boulangier*. La température de 120 à 150°, nécessaire pour la cuisson du pain, est également convenable pour la cuisson de cette poudre de gypse qui reste de 12 à 20 heures dans le four.

Dans les établissements, tels que les fabriques d'objets céramiques, où l'on met en œuvre, pour le moulage des pièces, des quantités de plâtre relativement considérables, on fait souvent usage de fours spéciaux. Ils consistent en une large sole en fonte, recouverte par une voûte surbaissée. Dans la paroi antérieure se trouve ménagée une ouverture que l'on peut fermer au moyen d'une porte en bois et qui sert à introduire la matière et à la retirer après la cuisson. Au sommet de la voûte est pratiquée une seconde ouverture, munie d'un conduit en bois, par lequel s'échappe la vapeur d'eau.

Le gypse pulvérisé, est étendu sur la sole en couches de 5 à 6 centimètres d'épaisseur.

Le foyer, de dimensions relativement restreintes, est placé au-dessous et les produits de la combustion, avant de se rendre dans la cheminée, circulent dans des carneaux, disposés sous la plaque de fonte, de manière à présenter le plus grand développement possible.

Dès que le gypse a atteint la température pour laquelle le dégagement de l'eau devient très énergique, il se produit une série de phénomènes particuliers, qui fournissent d'utiles indications à l'ouvrier chargé de la conduite de l'opération. Très peu de temps après le moment où l'eau a commencé à abandonner le gypse, le dégagement s'accroît nettement et se manifeste par des mouvements de la matière.

La poudre, maintenue, pour ainsi dire, en suspension par les vapeurs qui s'échappent de tous côtés, commence par se mettre de niveau, comme le ferait un liquide, puis on voit se former, en plusieurs points, de petits cratères qui donnent lieu à un dégagement de vapeur mêlée de poussière. Le râteau de bois dont on se sert pour remuer la masse ne rencontre, dans ses mouvements, qu'une très faible résistance; les sillons qu'il trace se referment aussitôt d'eux-mêmes et les cratères qu'ils font disparaître sont incessamment remplacés par d'autres. Au bout d'un certain temps, cependant, le bouillonnement de la masse diminue, puis il devient intermittent et ne se produit plus qu'aux points où la matière vient d'être remuée: enfin, il s'arrête complètement et la poudre, cessant de rester en suspension, se tasse et forme une masse plus dense. La cuisson du plâtre est alors terminée; il ne reste plus qu'à le retirer, à le faire passer sur le tamis de crin ou sur le tamis de soie, suivant le degré de finesse que l'on veut obtenir, et à le verser dans des caisses ou récipients fermés, où il est conservé jusqu'au moment de l'emploi.

Dans quelques cas, le plâtre fin de moulage est soumis à la cuisson en morceaux de la grosseur d'un œuf; ce mode d'opérer est bien inférieur au précédent, parce que l'action de la chaleur est moins uniforme et que l'opérateur n'a pas, pour se guider, des signes aussi certains. Dans ce dernier cas, on considère la cuisson comme terminée, quand les morceaux donnent une cassure d'un mat terreux ne présentant plus que très peu de parties brillantes.

La cuisson en poudre a pour résultat de donner du plâtre d'une prise un peu plus lente, ce qui est souvent un avantage pour la mise en œuvre. D'après M. Landrin¹, si l'on cuit simultanément, dans les mêmes conditions de température, des poids égaux de plâtre en morceaux et de plâtre en poudre dans une étuve chauffée de 150 à 200°, jusqu'à ce qu'ils aient perdu toute leur eau de cristallisation et si l'on mélange ensuite, poids pour poids, avec l'eau ces plâtres finement pulvérisés, on constate que le plâtre cuit en morceaux fait prise en 5 minutes, tandis que le plâtre cuit en poudre ne fait prise qu'en 20 minutes. Ce ralentissement dans la prise est très vraisemblablement dû à l'action de la chaleur, qui s'est fait plus vivement sentir sur le plâtre en poudre; ce qui tend à le prouver, c'est qu'en cuisant plus longtemps le plâtre en morceaux on lui communique une prise plus lente.

Pulvérisation du plâtre. — Le plâtre destiné aux constructions, étant cuit en morceaux, doit être réduit en poudre au sortir des fours. Cette pulvérisation s'opère dans des appareils analogues à ceux que nous avons indiqués pour le broyage du ciment.

Le plus ordinairement, on se sert, pour cette opération, de moulins à pilons, de meules verticales ou manège à roues que l'on met en mouvement au moyen d'un ou de deux chevaux. On se sert également de moulins à meules horizontales analogues aux moulins à farine et quelquefois de ces derniers moulins eux-mêmes.

A la sortie des appareils de broyage, le plâtre est passé sur un tamis et la poudre est recueillie dans des sacs. Cette poudre, pour le plâtre destiné aux maçonneries, ne

1. Comptes rendus à l'Académie des sciences, 1878.

doit pas être trop fine : un broyage trop parfait lui ferait perdre une partie de ses propriétés plastiques.

DU PLÂTRE CUIT.

Le plâtre, convenablement cuit, est doux au toucher et s'attache aux doigts. Lorsque, au contraire, le plâtre n'est pas assez cuit, il est aride, n'absorbe l'eau que plus difficilement et acquiert moins de cohésion. Enfin, quand il est fritté, par conséquent trop cuit, il n'absorbe plus l'eau et s'égrène quand on l'emploie.

Les plâtres de mauvaise qualité sont, en général, d'une couleur jaunâtre; ils sont rudes au toucher comme le calcaire en poudre; fortement comprimés dans la main, ils ne conservent pas l'empreinte des doigts et tombent en poussière comme du sable; leur prise est lente; enfin, ils donnent des enduits qui se gercent facilement et qui, au lieu de résonner sous la truelle brettée, se rayent profondément.

Au point de vue de l'emploi dans les constructions, on distingue à Paris trois sortes de plâtre :

1° Le *plâtre au panier* est le plâtre ordinaire, tel que le livre le fabricant. Il est employé pour faire les aires de plancher, pour hourder et faire les crépis. On appelle encore ainsi le plâtre tamisé dans un panier d'osier et par conséquent plus fin que le précédent; ce dernier sert ordinairement à faire les crépis de faible épaisseur;

2° Le *plâtre au sas* est celui qui est passé dans un tamis de crin; il est employé pour faire les enduits et les moulures. Les résidus retenus par le tamis, désignés sous le nom de *mouchettes*, sont mélangés avec le plâtre ordinaire et utilisés pour faire de gros ouvrages;

3° Le *plâtre au tamis* est celui qui est passé dans un tamis de soie; ce plâtre d'une grande finesse est réservé pour les travaux les plus soignés, et en particulier pour les moulures qui doivent recevoir de la peinture. Enfin, on distingue encore la *fleur de plâtre*, qui est formée d'une poussière encore plus fine que le plâtre au tamis; on l'obtient en faisant sauter le plâtre au tamis sur une pelle à laquelle la fleur s'attache facilement, d'où le nom de *plâtre à la pelle* que lui donnent parfois les maçons.

Le plâtre cuit doit être conservé dans un endroit sec et autant que possible à l'abri du contact de l'air. Sans cette précaution, il perd insensiblement la faculté de se solidifier en quelques instants, quand il est mélangé avec une quantité d'eau convenable; on dit alors qu'il est *éventé*.

On peut toutefois conserver du plâtre pendant près d'un an, en le mettant en tas sur un sol sec; pour assurer sa conservation, il faut, dans ce cas, éviter de l'adosser à des murs en maçonnerie et arroser légèrement et uniformément la surface, de manière à former une croûte préservatrice contre les influences atmosphériques.

PRISE DU PLÂTRE.

Nous avons dit que le plâtre cuit, mis en présence d'un excès d'eau, jouissait de la propriété de se prendre en masse, en se combinant avec une partie de cette

eau. La quantité d'eau ajoutée a une influence sur la rapidité de la prise et sur la dureté finale du plâtre, mais un très grand excès d'eau n'est pas un obstacle absolu à la prise. On peut ainsi obtenir, non seulement des bouillies, mais encore des liquides plus ou moins épais, qui arrivent à se solidifier au bout d'un certain temps.

D'après l'opinion généralement admise, lorsque le plâtre cuit se trouve en présence de l'eau, il n'y a pas seulement hydratation, mais en même temps cristallisation de l'hydrate formé. Ce sont ces cristaux qui, en s'enchevêtrant les uns dans les autres, s'agrègent en une masse solide encore imprégnée d'un excès d'eau saturée de sulfate de chaux. Par la dessiccation, ce sulfate de chaux dissous cristallise peu à peu en augmentant notablement la résistance de la masse solide déjà formée. Suivant Gay-Lussac, il existe, en outre, un certain rapport entre la résistance définitive du plâtre et celle de la pierre qui lui a donné naissance; en d'autres termes, le plâtre, après la prise, est, toutes choses égales d'ailleurs, d'autant plus résistant que le gypse dont il provient était plus dur et plus compact avant la cuisson.

Cette explication de la prise du plâtre se trouve complétée par des observations directes faites il y a quelques années par M. Landrin¹. D'après lui, lorsqu'on examine au microscope ce qui se passe pendant la prise, on peut diviser le phénomène en trois temps :

1° Le plâtre cuit prend, au contact de l'eau, une forme cristalline ;

2° L'eau, qui entoure les cristaux, dissout une certaine proportion de sulfate de chaux ;

3° Une partie du liquide s'évapore, par le fait de la chaleur dégagée dans la combinaison chimique; un cristal se forme et détermine la cristallisation de toute la masse par un phénomène analogue à ce qui se passe quand on jette une parcelle de sulfate de soude dans une solution saturée de ce sel.

M. Le Châtelier, dans une note sur le mécanisme de la prise du plâtre présentée à l'Académie des sciences², fait remarquer que la transformation directe, comme on l'a admis jusqu'ici, du sulfate de chaux, anhydre, *solide*, en sulfate hydraté, cristallisé également *solide*, constituerait une exception aux lois générales de la cristallisation. Il observe de plus que le fait de la cristallisation n'entraîne pas nécessairement l'aggrégation de la masse. Le sulfate de chaux, par exemple, précipité d'une dissolution concentrée par l'alcool, présente le maximum d'enchevêtrement de cristaux, et cependant le précipité, soumis à la dessiccation, ne possède aucune solidité.

M. Le Châtelier est, dès lors, conduit à émettre, pour la prise du plâtre et des autres sels analogues, une théorie nouvelle, basée sur les phénomènes de sursaturation observés par M. Marignac et qui peut s'énoncer de la manière suivante :

La prise du plâtre est le résultat de deux phénomènes bien distincts quoique simultanés : d'une part, les parcelles de sulfate de chaux anhydre, gâchées avec de l'eau, se dissolvent en s'hydratant et produisent une dissolution sursaturée; d'autre part, cette même dissolution laisse déposer des cristaux de sulfate hydraté. Ceux-ci vont en augmentant peu à peu de volume et se soudent les uns aux autres, comme le font tous les cristaux qui se déposent lentement d'une dissolution saline.

1. Comptes rendus à l'Académie des sciences, 1874.

2. Comptes rendus, mars 1883.

Cette cristallisation continue aussi longtemps qu'il reste du sel anhydre pour se dissoudre et entretenir la sursaturation de la liqueur.

Tous ceux qui emploient le plâtre savent, d'ailleurs, qu'il n'acquiert son maximum de dureté qu'au bout d'un certain temps; à ce moment, le plâtre ne contient plus que la quantité d'eau nécessaire pour correspondre à la formule $\text{SO}_3, \text{CaO}, 2\text{H}_2\text{O}$, c'est-à-dire environ 21 pour 100 d'eau.

Le plâtre cuit, à l'état normal, contenant toujours 7 à 8 pour 100 d'eau, il faudrait théoriquement ajouter au plâtre 13 à 14 pour 100 d'eau pour avoir immédiatement le maximum de prise. Or, pour faire une pâte avec de l'eau et une poudre semblable au plâtre, la quantité d'eau nécessaire est au minimum de 33 pour 100; c'est donc 20 pour 100 de liquide qu'on est obligé d'ajouter en trop.

Dans la pratique, ce minimum se trouve même considérablement dépassé, à cause de la rapidité de la prise, qui, avec cette quantité d'eau, s'effectuerait en quelques minutes et ne permettrait pas de mettre la matière en œuvre; aussi, les plâtres ordinaires sèchent lentement et quelquefois même ne sèchent pas du tout, si les conditions locales ne favorisent pas la dessiccation. C'est là, d'ailleurs, un fait d'expérience bien connu, et les maçons savent qu'il y a tout avantage à appliquer les enduits en plâtre par un temps très sec.

Outre l'inconvénient que présentent ces plâtres humides, au point de vue de leur dessiccation ultérieure, ils ont encore celui de devenir très poreux, par suite de l'évaporation de la grande quantité d'eau qu'ils renferment, lors de leur mise en œuvre.

Cette porosité a pour résultat de diminuer la résistance du plâtre et de favoriser la nitrification dans les lieux humides et soumis au contact des émanations ammoniacales.

Il y a donc, en définitive, des inconvénients de diverses natures à noyer les plâtres, au moment du gâchage, comme on le fait malheureusement trop souvent dans la pratique.

D'après cela, on se trouverait placé entre deux alternatives: ou n'ajouter que le minimum d'eau nécessaire pour former une pâte, ce qui rend la manipulation très difficile, à cause de la rapidité de la prise, ou recourir à un assez fort excédent d'eau pour retarder la prise, ce qui nuit au résultat final que l'on veut obtenir.

On comprend donc l'intérêt qu'auraient les constructeurs à employer des plâtres à prise lente pouvant être gâchés avec une faible quantité d'eau. Les expériences faites par M. Landrin méritent, sous ce rapport, d'être signalées¹.

On sait que le plâtre, cuit au rouge et gâché à la façon ordinaire, n'est pas susceptible de faire prise; mais, ce que l'on n'avait pas observé avant M. Landrin, c'est que si ce même plâtre, au lieu d'être noyé dans l'eau, n'est mélangé qu'avec la plus petite quantité d'eau possible, soit environ 33 pour 100 de son poids, il fait prise en 10 ou 12 heures et devient extrêmement résistant après son durcissement.

D'un autre côté, si l'on fait cuire du plâtre pendant un temps suffisamment court pour qu'il retienne, à la sortie du four, la proportion normale d'eau que renferme ordinairement le plâtre au moment de son emploi, soit 7 à 8 pour 100, ce plâtre ne peut pas être manipulé, car il fait prise presque instantanément. Mais si l'on

1. Comptes rendus à l'Académie des sciences, 1878.

prolonge l'action de la chaleur de manière à le déshydrater complètement et qu'on le laisse ensuite exposé à l'air, il reprend d'abord très rapidement les 8 pour 100 d'eau, puis l'absorption ne se fait plus qu'avec une excessive lenteur. Ce plâtre, sous ce dernier état, jouit de propriétés toutes différentes de celui qui résultait d'une cuisson incomplète. Il fait prise lentement, tout en prenant une dureté normale. La proportion d'eau étant la même dans les deux cas, on doit conclure de ces expériences que l'action prolongée de la chaleur a pour résultat de modifier sensiblement les propriétés du plâtre. Ce résultat peut facilement s'expliquer par la théorie de M. Le Châtelier et les expériences de M. Marignac, attendu que le plâtre cuit à 140° et qui retient encore 7 à 8 % d'eau est précisément celui qui produit les dissolutions les plus fortement sursaturées.

Dans la pratique, on est arrivé à obtenir des plâtres à prise lente par des procédés particuliers; tels sont les plâtres *alunés* ou *stucs*, auxquels on peut n'ajouter que le minimum d'eau sans qu'il en résulte de difficultés pour leur manipulation; tels sont également les plâtres additionnés de matières solubles dans l'eau, lesquelles, en s'interposant entre les cristaux, les empêchent, pendant quelque temps, de s'unir et retardent ainsi la prise. Parmi ces matières, les plus usitées sont la gomme, la glycérine, la gélatine, la poudre de guimauve, etc. Les matières inertes insolubles dans l'eau, comme le sulfate de baryte, le sable, l'oxyde de fer, ne remplissent pas le même but; elles diminuent la cohésion du plâtre sans produire d'effet sur la prise.

Dans l'emploi des plâtres à prise lente, il peut arriver qu'à un moment donné on ait intérêt à déterminer une prise instantanée; on obtient ce résultat en plaçant à la surface du mortier des matières hygrométriques qui ont pour effet de hâter sa dessiccation: le sel marin, les sels anhydres, tels que le carbonate de soude sec, le sulfate de cuivre, etc., peuvent ainsi être utilisés pour activer la prise du plâtre. On arrive à un résultat semblable en chauffant légèrement le plâtre, lorsqu'il vient d'être gâché.

Dans le cas de plâtres trop cuits qui ne font plus prise isolément, la cristallisation peut être déterminée par leur mélange avec des plâtres ordinaires; la prise de ces derniers se propageant dans toute la masse, comme dans une solution sursaturée, détermine la cristallisation du plâtre trop cuit (Landrin).

Gâchage. — Pour gâcher le plâtre, on commence par mettre l'eau dans l'auge qui doit servir à la manipulation; on ajoute ensuite le plâtre en le répandant bien uniformément jusqu'à ce qu'il atteigne presque la surface de l'eau; puis, dès qu'il commence à prendre, on le remue avec la truelle de manière à former une pâte bien homogène. Une truelle en cuivre est absolument nécessaire pour cette manipulation: les truelles en fer sont promptement oxydées et détruites; de plus, le plâtre y adhère trop fortement.

La proportion d'eau employée pour le gâchage varie suivant la nature des ouvrages que l'on a à exécuter:

Gâcher serré, c'est n'ajouter que la quantité d'eau nécessaire pour former une pâte d'une consistance convenable, qui doit être employée immédiatement. Ce gâchage convient pour faire des saillies-masses, exécuter des corniches, etc.

Gâcher clair, c'est former avec l'eau une pâte un peu liquide, qui est alors d'une

prise moins rapide et qui convient pour les enduits. On gâche d'autant plus clair que les enduits à appliquer sont de plus faible épaisseur.

Enfin, lorsqu'il s'agit de remplir des vides, où la main ni la truelle ne peut pénétrer, on forme un *coulis* qui doit être assez clair pour se répandre dans les cavités les plus petites. Le plâtre ainsi délayé ne se solidifie qu'imparfaitement et au bout d'un certain temps; aussi ne doit-on l'employer que pour cimenter des portions de maçonneries qui n'ont pas de charge à supporter.

Les fabricants d'objets et de moules en plâtre ont adopté, à peu près généralement, un procédé de gâchage qui, moyennant une faible perte de matière, permet d'obtenir, d'une manière simple et pratique, un dosage convenable de l'eau et du plâtre et d'arriver, par conséquent, à une bouillie d'une consistance satisfaisante, complètement purgée d'air, ce qui est d'une grande importance pour la reproduction des objets d'art. Dans un récipient contenant un grand excès d'eau, on projette le plâtre en poudre, par très petites quantités à la fois, en ayant soin de ne répandre une nouvelle couche à la surface du liquide que quand la précédente s'est combinée et est descendue au fond. Lorsqu'on a ainsi introduit la quantité totale de plâtre à mettre en œuvre, on trouve, au fond du vase, une espèce de crème épaisse ou de bouillie liquide, recouverte par l'eau en excès. Cette eau, qui a pris un aspect laiteux, est décantée avec précaution, et la bouillie liquide peut alors être utilisée immédiatement pour le coulage.

Gonflement. Ainsi que nous l'avons dit, au moment où le plâtre s'hydrate, il y a production de chaleur due à la combinaison qui s'opère. De plus, il y a augmentation de volume provenant de la cristallisation confuse qui se forme avec une très grande rapidité.

D'après MM. Claudel et Laroque, un mètre cube de plâtre en poudre donne 1^m,18 de mortier au premier instant de la solidification. Le gonflement au bout de 24 heures est de 1 pour 100, dont la moitié est déjà produite une heure après l'emploi.

Cette propriété que possède le plâtre d'augmenter de volume en durcissant le rend très propre au moulage d'ouvrages d'art, en ce qu'elle force la matière à pénétrer dans tous les creux du moule; mais elle pourrait devenir nuisible dans les constructions, si l'on négligeait d'en tenir compte. Tous les constructeurs savent qu'il faut prévoir le gonflement de cette matière et lui donner toutes facilités pour se produire sans inconvénient.

Résistance et adhérence. — Le plâtre arrive à sa cohésion finale après un mois d'exposition à l'air, sous une température de 20 à 25°; mais, à l'inverse de ce qui a lieu pour les mortiers de chaux, il perd de sa dureté en vieillissant.

Sa résistance maximum à la traction varie de 12 à 16 kilogrammes par centimètre carré; mais, si on mélange au plâtre moitié de son volume de gros sable, cette résistance s'abaisse à 5 kilogrammes et même à 3^m,75, quand le sable s'approche du menu gravier.

Sa résistance à l'écrasement, dans l'état où on l'emploie ordinairement, est d'environ 50 kilogrammes par centimètre carré.

L'adhérence du plâtre aux pierres et à la brique est toujours moindre que sa

force de cohésion avec lui-même; elle est d'environ 5 kilogrammes lorsque l'effort de traction est normal au plan de rupture et de 4^{kg},5, lorsque l'effort est parallèle à ce plan.

Son adhérence au bois est facile mais faible; son adhérence au fer s'élève à 10 kilogrammes après neuf jours et à 17 kilogrammes après dix-sept jours; mais, en général, l'adhérence du plâtre diminue beaucoup avec le temps¹.

Le plâtre s'altère dans les endroits humides et, à la longue, il se délayerait dans l'eau; c'est pourquoi on ne doit jamais l'employer que pour des constructions faites dans des endroits secs et aérés.

PROCÉDÉS DE DURCISSEMENT DU PLÂTRE.

Plâtre aluné. — Depuis un certain nombre d'années, on prépare, au moyen du plâtre, une nouvelle substance plastique désignée sous les noms de *plâtre aluné*, *ciment français*, *ciment anglais* ou *stuc*, qui, tout en conservant une partie des propriétés de la matière première, en acquiert de nouvelles, en particulier une dureté beaucoup plus grande.

L'emploi de l'alun, pour produire le durcissement du plâtre, a été indiqué en premier lieu par Pauware. D'après son procédé, les objets en plâtre, après moulage, étaient plongés dans une dissolution d'alun composée de 1 pour 100 d'alun exempt de fer et de 12 pour 100 d'eau, à la température de 15°. Après un mois de séjour dans cette dissolution, les objets étaient lavés, puis séchés dans un courant d'air chaud. Le plâtre, soumis à ce traitement, était devenu plus dur, ne tachait plus les doigts et ne se laissait pas facilement rayer par l'ongle; mais, au bout de quelque temps, les objets ne résistaient pas à l'influence de l'humidité et ils prenaient une coloration grisâtre, inégalement répartie. En outre, le plâtre ainsi aluné se ramollissait dans l'eau pure au point de prendre facilement l'impression des doigts.

Greenwood a perfectionné ce procédé de la manière suivante : Le plâtre en pierres, préalablement cuit comme le plâtre ordinaire, est plongé dans une solution contenant 8 à 10 pour 100 d'alun. Après une immersion de quelques minutes, on laisse égoutter et sécher à l'air; puis on le soumet à une dernière cuisson dans un feu où la température, bien uniforme et constante, doit être poussée jusqu'au rouge sombre, sans toutefois dépasser cette limite.

Récemment, on est même arrivé à préparer ce produit au moyen d'une seule cuisson, en mélangeant intimement le plâtre cru avec de l'alun en poudre.

Les objets, que l'on exécute avec ce plâtre, se solidifient plus lentement; mais ils finissent par prendre une dureté analogue à celle de l'albâtre et du marbre; de plus, ils présentent dans les parties de faible épaisseur et sur leurs arêtes, une espèce de translucidité, qui les rapproche encore de ces matières par l'aspect. Des dalles d'une certaine épaisseur sont très difficiles à briser à coups de marteau. Exposées, pendant des mois entiers, aux intempéries de l'air, elles restent intactes, sans rien perdre de leur dureté. D'après Elsner, un séjour de plusieurs heures dans l'eau bouillante n'altère pas sensiblement la résistance du plâtre aluné.

1. *Technologie du bâtiment* (Château).

Ce phénomène du durcissement des plâtres alunés a été expliqué de différentes manières : Payen pensait que la dureté de ces plâtres était due à la formation d'un sulfate double de chaux et de potasse, dont les cristaux étaient englobés dans un précipité d'alumine. M. Landrin¹, en analysant plusieurs échantillons de plâtres alunés, tels qu'on les emploie comme stucs ou ciments en France et en Angleterre, a constaté qu'ils sont presque complètement purs et tout à fait exempts d'alumine et de potasse.

Le tableau suivant donne les résultats de quelques-unes de ces analyses :

| DÉSIGNATION DES ÉCHANTILLONS. | Sulfate de chaux. | Carbonate de chaux. | Silice. | Eau. | Total. |
|---|-------------------|---------------------|---------|------|--------|
| Plâtre aluné, dit ciment français | 96,75 | 1,05 | 0,72 | 1,48 | 100 |
| — dit ciment anglais, n° 1 | 98,19 | 0,41 | » | 1,40 | 100 |
| — — n° 2 | 98,02 | 0,57 | 0,42 | 1,19 | 100 |
| — dit stuc | 98,05 | 0,50 | 0,51 | 1,08 | 100 |

Il résulte, en outre, de ce tableau que ces divers échantillons ont tous été très bien cuits, la faible proportion d'eau qu'ils contiennent étant de l'eau hygrométrique.

M. Landrin a été ainsi conduit à admettre que l'alun n'agissait que par l'acide sulfurique qu'il contenait pour transformer tout le carbonate de chaux en sulfate de chaux.

Pour vérifier l'exactitude de cette interprétation, il a fait agir d'abord sur du plâtre un certain nombre de sulfates solubles, tels que les sulfates de soude, de potasse, d'ammoniaque, etc. En ayant soin de n'ajouter au plâtre que la quantité de sulfate rigoureusement nécessaire pour saturer le carbonate de chaux, il obtint sensiblement les mêmes résultats qu'avec l'alun.

Il a ensuite constaté que l'acide sulfurique seul pouvait jouer le même rôle, ce qui l'a amené à indiquer un nouveau procédé pour la préparation des plâtres dits alunés ou stucs.

Ce procédé consiste à tremper, pendant 15 minutes environ, les plâtres crus dans de l'eau contenant 8 à 10 pour 100 d'acide sulfurique et à les soumettre ensuite à la cuisson au rouge sombre.

Par ce procédé, non seulement on obtient des stucs de première qualité, au point de vue de la lenteur de la prise et de la dureté ; mais encore, grâce à la présence d'un petit excès d'acide sulfurique, les matières organiques, qui se trouvent toujours en petites quantités dans le gypse, sont brûlées, de telle sorte que les plâtres produits, au lieu de la couleur grisâtre de tous les stucs, sont d'une blancheur exceptionnelle.

Il est, toutefois, essentiel, dans ce mode de préparation, de chasser entièrement l'acide sulfurique libre ; car la moindre trace de cet acide suffirait pour altérer

1. Comptes rendus à l'Académie des sciences (1874).

les propriétés du plâtre, en le rendant très hygrométrique. La température convenable pour la cuisson doit être comprise entre 600 et 700°.

L'alunage n'ayant pour effet que d'augmenter la proportion du sulfate de chaux contenu dans le plâtre ordinaire, sans introduire de nouveaux éléments, on doit attribuer le ralentissement de la prise des plâtres alunés à l'action de la température élevée à laquelle ils sont portés pendant leur préparation. Il y a donc en définitive, une analogie complète entre les phénomènes de prise des plâtres ordinaires et des plâtres alunés ou sulfatés.

Emploi de la colle-forte. — On exécute également des stucs en gâchant le plâtre avec une dissolution assez claire de colle-forte ou de tout autre matière gélatineuse. Le plâtre choisi doit être de la meilleure qualité, cuit à point et non éventé; on le pile dans un mortier et on le passe au tamis de soie très fin.

Après gâchage, la pâte obtenue est étendue bien également et lissée avec la truelle; puis, lorsque le stuc est parfaitement sec, on commence à le polir avec de la pierre ponce ou avec un morceau de grès assez doux; on continue le polissage avec du tripoli et un morceau de feutre et on achève de lui donner le lustre avec de l'eau de savon, d'abord, et enfin avec de l'huile. On doit avoir soin de frotter, sans décompenser, jusqu'à ce que le lustre soit obtenu; sans cette précaution, le stuc se ternirait.

Pour avoir des stucs colorés, ayant l'apparence du marbre, on emploie divers oxydes métalliques, tels que l'hydrate de peroxyde de fer, les oxydes de chrome, de manganèse, de cuivre, les hydrocarbonates de cuivre, etc. Ces diverses matières sont mélangées à la dissolution de colle-forte qui sert au gâchage.

Si l'on veut donner au stuc un aspect rubané, on apprête séparément des pâtes des différentes couleurs à employer, on les étale en galette, puis on les superpose sur une tablette, de manière à ne former qu'un gâteau qu'on découpe ensuite par tranches et qu'on applique immédiatement sur la surface qui doit recevoir l'enduit. Les centres de marbrure sont obtenus au moyen de noyaux en plâtre coloré que l'on dispose de place en place. Comme précédemment, dès que l'enduit est sec, on procède au polissage.

Les stucs que l'on prépare ainsi résistent mal à l'humidité; en outre, leur réussite dépend naturellement beaucoup de l'habileté de l'ouvrier qui les exécute.

Emploi du borax et du tartre. — Keating et, avant lui, Keene ont recommandé, pour produire le durcissement du plâtre, l'emploi d'une dissolution de borax et de tartre; les meilleures proportions, d'après eux, sont, en poids : 1 partie de borax et 1 partie de tartre, pour 18 parties d'eau.

Les pierres à plâtre, après leur cuisson, sont immergées dans cette solution pendant un temps suffisant pour s'en imprégner complètement; puis elles sont desséchées et soumises à une nouvelle cuisson, à la température du rouge sombre, pendant six heures.

On peut également employer le borax seul. Le plâtre durcit d'autant plus lentement que la solution est plus concentrée. Si l'on emploie 1 volume d'une dissolution saturée de borax pour 12 volumes d'eau, la prise a lieu au bout d'un quart d'heure environ; avec 8 volumes d'eau, elle ne se produit qu'au bout

d'une heure, et enfin, avec 4 volumes, elle se trouve retardée de plusieurs heures (Casentini).

Emploi du silicate de potasse. — D'après Knaur et Knop, les objets moulés en plâtre ordinaire, tels que les statues, arrivent à une très grande dureté, lorsqu'on les enduit au pinceau avec un liquide obtenu de la manière suivante : Dans une lessive de potasse, composée de 1 partie de potasse caustique et de 5 parties d'eau, on ajoute du lait caillé, aussi exempt que possible de matières grasses. On prend ensuite 4 parties de cette dissolution pour la mélanger avec une partie de silicate du commerce de consistance sirupeuse.

Le liquide ainsi obtenu doit être appliqué avec de grandes précautions; il importe, en effet, d'imprégner complètement la surface du plâtre, tout en évitant un excès de liquide, qui, en formant glaces sur cette surface, ferait apparaître les coups de pinceau. Toutefois, ce dernier défaut, s'il vient à se produire, peut être corrigé, à la rigueur, en lavant l'objet avec de l'eau de chaux et une éponge.

Lorsque l'application a été bien faite, le plâtre se trouve avoir complètement perdu son aspect crayeux et présente un ton léger et assez agréable.

Assez souvent, pendant l'application même du liquide sur le plâtre, il se produit une série de taches noires, irrégulières, de sulfure de fer, résultant de l'action du soufre de la caséine sur les traces de fer que contient le plâtre; mais ces taches disparaissent d'elles-mêmes, pendant la dessiccation.

Emploi de la vapeur d'eau pour le gâchage. — La porosité finale d'un plâtre augmente avec la quantité d'eau employée pour le gâchage. Il en résulte que si l'on veut obtenir une très grande dureté, il faut s'attacher à réduire au minimum la quantité d'eau ajoutée au plâtre et en même temps exercer une puissante pression mécanique pour rapprocher les molécules qui manqueraient de liaison entre elles.

M. Abate est arrivé à gâcher le plâtre avec une quantité d'eau très minime en employant l'eau à l'état de vapeur. A cet effet, le plâtre est placé dans un tambour cylindrique tournant horizontalement sur son axe et mis en communication avec un générateur de vapeur. Le plâtre absorbe ainsi, en très peu de temps et d'une manière très régulière, la quantité d'eau strictement nécessaire pour sa prise et conserve l'état pulvérulent. Sous cet état, le plâtre est introduit dans des moules et soumis à l'action d'une pression hydraulique. Au bout de quelques instants, l'opération est terminée et les blocs peuvent être retirés des moules. Ces blocs présentent une compacité et une dureté exceptionnelles et peuvent prendre le poli du marbre.

Emploi de la stéarine. — On emploie quelquefois la stéarine pour donner aux objets en plâtre un aspect plus satisfaisant et en rendre le nettoyage plus facile.

Lorsque l'on plonge un objet en plâtre, bien sec, dans un bain de stéarine fondue, celle-ci pénètre profondément dans les pores et, après refroidissement, le plâtre acquiert une surface parfaitement lisse, à laquelle on peut facilement donner un certain brillant et obtenir, ainsi, un aspect qui se rapproche beaucoup de celui de l'écume de mer fondue dans la cire.

Pour assurer la réussite de cette opération, la température doit être assez élevée

pour que la stéarine puisse pénétrer convenablement dans les pores du plâtre; mais il faut, en même temps, éviter un excès de chaleur qui aurait pour effet de ternir le plâtre en lui enlevant de l'eau et de donner à la stéarine une teinte brune.

Pour ces motifs, il y a avantage à recourir à l'emploi de bains chauffés par la vapeur. Enfin, on doit veiller, avec le plus grand soin, à ce que le plâtre soit parfaitement propre, car toute impureté existant à la surface se traduit généralement, après l'immersion, par la production d'une tache foncée. Au moyen de couleurs solubles dans les corps gras, comme la gomme-gutte et la résine sang-dragon, il est, en outre, facile de donner aux objets un ton clair, d'un jaune rougeâtre qui relève avantageusement leur aspect.

Ce procédé exige l'emploi d'une quantité relativement considérable de stéarine. On a cherché à éviter cet inconvénient en étendant la stéarine sur le plâtre, préalablement chauffé; mais il est assez difficile, dans ce cas, d'obtenir le degré de température convenable. On a également essayé d'une dissolution de stéariné dans dix fois son poids d'essence de pétrole; mais, à cause des dangers que présente l'emploi de ce liquide, ce procédé ne s'est guère répandu.

Composition chimique. — La proportion de sulfate de chaux contenue dans les plâtres cuits varie dans d'assez larges limites suivant les carrières d'où proviennent les pierres soumises à la cuisson.

Le carbonate de chaux et le carbonate de magnésie s'y rencontrent presque toujours, et les plâtres des environs de Paris en contiennent même jusqu'à 15 et 18 pour 100.

Nous donnons, dans le tableau suivant, un extrait des analyses faites par M. Durand-Claye sur divers échantillons de plâtre présentés à l'Exposition universelle de 1878.

| NATURE ET PROVENANCE des plâtres. | Résidu insoluble dans les acides. | Alumine et peroxyde de fer. | Sulfate de chaux. | Carbonate de chaux. | Carbonate de magnésie. | Eau, etc. |
|--------------------------------------|--|--------------------------------------|-------------------------|---------------------------|------------------------------|-----------|
| Vitry (Seine), ordinaire..... | 4,90 | 2,50 | 70,90 | 10,20 | 5,05 | 6,45 |
| — fin..... | 5,70 | 2,70 | 72,60 | 12 | 5,45 | 5,55 |
| Villejuif (Seine)..... | 4,80 | 0,60 | 77,95 | 8,50 | 1,90 | 6,25 |
| Bondy (Seine), ordinaire..... | 4,40 | 1,50 | 79,05 | 9,90 | 2,30 | 5,85 |
| — fin..... | 2,40 | 1 | 85,40 | 6,90 | 2,50 | 4 |
| Romainville (Seine)..... | 0,60 | 0,80 | 87,70 | 2,40 | 2,70 | 5,80 |
| Bois-le-Comte (Seine-et-Marne)... | 1,20 | 0,55 | 85,75 | 4,50 | » | 8,40 |
| Lamarche —..... | 1,60 | » | 88,45 | 3,75 | » | 6,20 |
| Bussières —..... | 1,05 | 0,45 | 84 | 7,15 | 0,40 | 6,95 |
| Roquevaire (Bouches-du-Rhône)... | 11,20 | 5,10 | 70,55 | 6,70 | 5,65 | 2,80 |
| Bassin de la Couze (Dordogne).... | 4 | 1,40 | 71,60 | 14,10 | 5,05 | 5,85 |
| Hérépiant (Hérault)..... | 4,20 | 1 | 81,60 | » | » | 15,20 |
| Portel (Aude)..... | 0,70 | 0,40 | 86,85 | 5,30 | » | 6,75 |
| Malucène (Vaucluse), blanc..... | 0,60 | » | 92,90 | 0,55 | » | 6,15 |
| Poligny (Jura)..... | 0,80 | » | 95,50 | 5,40 | » | 2,50 |
| Grasse (Alpes-Maritimes)..... | 0,10 | 0,20 | 95,65 | » | » | 4,05 |

Influence de la chaux sur la prise du plâtre. — Le plâtre est assez souvent mélangé au mortier de chaux pour former un mortier bâtard employé pour les enduits de murs.

Ce mortier a le grand avantage de durcir rapidement, de résister beaucoup mieux à l'humidité que les plâtres ordinaires et de pouvoir prendre un très beau poli; de plus, lorsque la proportion de chaux est assez considérable, il ne gonfle pas comme le plâtre seul.

Les proportions de chaux que l'on peut ainsi mélanger au plâtre sont très variables; avec 75 pour 100 de chaux, on obtient encore un mortier d'une densité très faible et susceptible de prendre une très grande dureté. Toutefois, il convient de se tenir notablement au-dessous de cette limite.

Ordinairement, pour la confection des enduits, on emploie un mortier composé de 400 kilogrammes de plâtre pour 1 mètre cube de mortier ordinaire.

Les qualités de ces mortiers tiennent à ce que la chaux, au contact de l'eau, dégage une quantité de chaleur qui détermine l'évaporation de l'excédent d'eau ajoutée pour le gâchage du plâtre et produit par suite une dessiccation beaucoup plus rapide. En outre, l'acide carbonique de l'air, en s'unissant peu à peu à la chaux, ne peut qu'augmenter la solidité et la durée des constructions dans lesquelles entrent ces mortiers.

Il convient toutefois de faire remarquer que la bonne réussite de pareils mortiers doit dépendre essentiellement d'un mélange parfaitement intime de la chaux avec le plâtre.

C'est à la présence du carbonate de chaux dans le gypse qu'on attribue l'excellence du plâtre des environs de Paris sur tous les autres plâtres. La température, dans les fours à plâtre, est, il est vrai, insuffisante pour transformer en chaux vive tout le carbonate de chaux contenu dans la pierre à plâtre; mais, en raison de l'état de division de ce carbonate, il peut y avoir décomposition partielle à la base du four. Pour ce motif, M. Landrin croit qu'il y aurait intérêt à placer, à la partie inférieure des fours, les plâtres du banc marabais qui contiennent la plus forte proportion de carbonate de chaux.

Pierre artificielle à base de plâtre. — M. Dumesnil a donné le moyen d'obtenir, avec le plâtre, des pierres artificielles susceptibles de remplacer la pierre de taille. On délaye dans 500 litres d'eau 7 kilogrammes d'alun, 6 kilogrammes de chaux éteinte et 1 kilogramme d'ocre jaune; on ajoute à ce mélange 1 kilogramme de colle-forte dissoute dans 5 litres d'eau chaude et on gâche ensuite 900 litres de plâtre. Le tout est intimement mélangé avec 450 litres de sable fin de rivière et forme une pâte que l'on coule dans des moules.

La matière fait prise en 12 heures et acquiert une grande dureté. On garantit ces pierres factices contre l'action des eaux pluviales en recouvrant la surface de silicate de potasse.

EMPLOI DU PLÂTRE CHEZ LES ANCIENS.

L'emploi du plâtre était connu des anciens ainsi qu'en attestent les vestiges d'un certain nombre de monuments égyptiens. Wallace, qui a fait l'analyse de différents

mortiers antiques, a trouvé, en particulier, pour la composition d'échantillons extraits de la grande pyramide de Chéops, les résultats suivants :

| COMPOSITION. | Intérieur du monument. | Extérieur du monument. |
|--------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Sulfate de chaux | 81,50 | 82,89 |
| Carbonate de chaux | 9,47 | 9,80 |
| Carbonate de magnésie. | 0,59 | 0,79 |
| Sesquioxyde de fer | 0,25 | 0,21 |
| Alumine. | 2,41 | 3 |
| Silice. | 5,50 | 4,51 |
| | 99,52 | 101 |

En rapprochant ces résultats de ceux que nous avons donnés précédemment, on peut constater une très grande analogie entre la composition de ces plâtres et ceux qui proviennent des carrières des environs de Paris.

TABLE DES MATIÈRES

CALCAIRES, CHAUX, CEMENTS, MORTIERS.

| | |
|--|----|
| Généralités sur la chaux. | 1 |
| Du carbonate de chaux. — Variétés naturelles : spath d'Islande, aragonite, calcaire saccharoïde, calcaire compact, albâtre calcaire, calcaire oolithique, craie ou calcaire terreux, craie tuffau, calcaire grossier, dolomie, marnes, calcaires bitumineux. | 3 |
| Analyse des calcaires. — Essai et analyse des calcaires employés directement dans les constructions. Détermination par l'analyse de la nature de la chaux que peut fournir un calcaire donné | 5 |
| Analyse complète : 1° calcaire non bitumineux ; 2° calcaire bitumineux. — Dosage du carbonate de chaux par les liqueurs titrées. | 7 |
| Des différentes espèces de chaux et ciments. | 11 |
| Distinction entre les chaux aériennes et les chaux hydrauliques ; entre les chaux grasses et les chaux maigres. | 11 |
| Classification des chaux hydrauliques d'après la rapidité de la prise. — Aiguille Vicat. | 12 |
| Indice d'hydraulicité. — Classification des chaux hydrauliques d'après la valeur de cet indice. | 12 |
| Chaux limites et ciment de Portland. | 13 |
| Ciments à prise rapide ou ciments romains. | 13 |
| Chaux magnésiennes. | 14 |
| Carbonates basiques de chaux. | 15 |

CUISSON DES PIERRES A CHAUX.

| | |
|--|----|
| Généralités sur la cuisson. | 16 |
| Des différents procédés de cuisson. | 18 |
| 1° Calcination intermittente à longue flamme. — Fours employés pour cette calcination : Four de campagne ; fours en maçonnerie, cylindriques ou prismatiques ; four de Fink ; fours de MM. Deblinne et Donop ; four Vicat. | 19 |
| 2° Calcination intermittente à courte flamme. — Cuisson en tas ; cuisson dans des fours. | 22 |

| | |
|---|----|
| 3° Calcination continue à courte flamme. — Four à cône renversé de Malain. Four ovoïde de Paviers et du Theil. | 24 |
| 4° Calcination continue à longue flamme. — Four de Rüdersdorf; four à deux foyers de M. Chanard; four de Raucourt; four de M. Simoneau. | 26 |
| Fours à circulation : Four annulaire de MM. Light et Hoffmann; four de Swann; four continu à tunnel; four de Steinmann. — Four de MM. Vigreux et Leroy-Desclosages. | 31 |
| Fours mixtes à chaux et à briques. | 38 |
| Four à chaux utilisant la chaleur perdue de certaines opérations industrielles; four à chaux adjoint à un haut-fourneau; four à chaux adjoint à des fours à coke. | 59 |
| Avantages et inconvénients des divers systèmes de four. | 40 |
| Phénomène de la cuisson des chaux : — 1° chaux grasses; 2° chaux hydrauliques. — Rendement de la pierre à chaux et retrait pendant la cuisson. | 41 |
| De la chaux cuite. — Influence du combustible sur les propriétés de la chaux. — Composition chimique d'un certain nombre de chaux. | 45 |
| Conservation des chaux : — 1° chaux vives; 2° chaux éteintes en poudre; 3° chaux en pâte. | 47 |

FABRICATION DES CHAUX HYDRAULIQUES.

| | |
|---|----|
| Procédé de la simple cuisson. — Procédé de la double cuisson. | 47 |
|---|----|

FABRICATION DES CEMENTS.

| | |
|---|----|
| Ciment naturel. — Cuisson des pierres à ciment. | 50 |
| Ciment artificiel. — Choix des matières premières. | 51 |
| Mélange et trituration par voie humide. — Bassins de dosage et de dépôt. — Formation des briquettes et séchage. | 55 |
| Mélange des matières par voie sèche. | 54 |
| Concassage des briquettes. | 54 |
| Cuisson. — Disposition des fours : Four Demarle et Lonquety. — Four Campbell. — Four Lipowitz. | 55 |
| Broyage et pulvérisation. | 56 |

PROPRIÉTÉS ET ESSAIS DES CEMENTS.

| | |
|---|-------|
| Densité. — Finesse des poudres. — Résistance à la traction et à la compression. — Pouvoir adhérent du ciment au sable. — Imperméabilité. — Résistance à l'usure. | 58-68 |
| Utilité de la conservation des ciments en magasin. — Changements de volume pendant la prise de certains ciments. — Durée et marche du durcissement. — Gâchage à l'eau de mer. | 69 |
| Composition chimique de ciments de diverses provenances. | 73 |
| Résumé. — Conditions que doit remplir un ciment de bonne qualité. | 75 |

DES POZZOLANES.

| | |
|--|----|
| Gisements. — Composition de diverses pouzzolanes naturelles. | 76 |
| Pouzzolanes artificielles : argile cuite ; schiste et basalte calcinés ; sables et arènes torréfiés ; grès argileux | 78 |
| Résidus d'exploitations industrielles employés comme matières pouzzolaniques : cendres de houille, de tourbe et de bois ; scories et laitiers, débris de briques et tuileaux ; ciment à l'eau-forte ; ciment éventé. | 80 |
| Remarques sur les pouzzolanes. | 81 |

ANALYSE DES CHAUX, CEMENTS ET POZZOLANES.

| | |
|--|----|
| 1° Analyse des chaux et ciments. | 84 |
| 2° Analyse des pouzzolanes. | 86 |

DES MORTIERS.

| | |
|--|-----|
| Généralités. | 87 |
| Des sables. — De leur rôle dans la composition des mortiers | 87 |
| Des différentes espèces de sable. | 88 |
| Extinction de la chaux : Extinction ordinaire. — Extinction par immersion et par aspersion. — Extinction spontanée | 89 |
| Foisonnement des chaux. — Influence du mode d'extinction sur la qualité des mortiers. — De l'eau à employer pour l'extinction. | 91 |
| Dosage des mortiers de chaux. — Rendement en mortier. | 94 |
| Préparation des mortiers de chaux. — Manipulation à bras ; — au manège à roues ; — tonneau broyeur. | 97 |
| Dessiccation des mortiers. — Action de la gelée. | 100 |
| Mortiers à base de chaux et de pouzzolanes. — Dosage des matières. — Préparation et emploi. | 101 |
| Mortiers de ciment. — Préparation : 1° mortiers de ciment à prise rapide ; 2° mortiers de ciment à prise lente | 103 |
| Mortiers de chaux et de ciment | 106 |
| Des mortiers antiques comparés aux mortiers du moyen âge et aux mortiers modernes. | 107 |

DE LA SOLIDIFICATION ET DES CAUSES D'ALTÉRATION DES MORTIERS.

| | |
|---|---------|
| 1° Mortiers de chaux grasses. — Causes du durcissement. — Causes d'altération. . . | 111 |
| 2° Mortiers hydrauliques. | 114 |
| Réactions qui déterminent la prise des chaux hydrauliques, d'après MM. Vicat et Berthier. | 115 |
| Recherches de M. Vicat sur les causes chimiques de la destruction des composés hydrauliques par l'eau de mer. | 116-124 |
| Travaux de MM. Rivot et Chatoney. | 125 |
| Travaux de M. Fremy. | 135 |
| Travaux de M. H. Le Châtelier. | 144 |
| Travaux de M. Landrin. | 146 |



DES PIERRES ARTIFICIELLES A BASE DE CHAUX ET DE CIMENT.

Bétons agglomérés. — Sable mortier coloré. — Pierres artificielles de M. Ransome. —
Ciments à base d'oxychlorures. 150-155

DU PLÂTRE.

| | |
|--|-----|
| Gisements. — Variétés de gypse. | 156 |
| Propriétés du sulfate de chaux. | 157 |
| Analyse d'une pierre à plâtre. | 160 |
| Cuisson du plâtre sous des hangars. — Cuisson dans des fours : four de Mont- martre; four Dumesnil. | 162 |
| Cuisson au moyen de gaz combustibles. — Cuisson par la vapeur d'eau surchauffée. — Fours continus. — Cuisson du plâtre destiné à l'agriculture. — Cuisson du plâtre fin. | 165 |
| Pulvérisation du plâtre. | 169 |
| Du plâtre cuit. — Des différentes sortes de plâtre en usage dans les constructions. . . | 170 |
| Prise du plâtre. | 170 |
| Gâchage. — Gonflement pendant la prise. | 175 |
| Résistance et adhérence. | 174 |
| Procédés de durcissement du plâtre : Plâtre aluné. — Emploi de la colle-forte; — de borax et de tartre; — du silicate de potasse. — Emploi de la vapeur d'eau pour le gâchage. | 175 |
| Emploi de la stéarine. | 178 |
| Composition chimique de divers plâtres du commerce. | 179 |
| Influence de la chaux sur la prise du plâtre. | 180 |
| Pierre artificielle à base de plâtre. | 180 |
| Emploi du plâtre chez les anciens. | 180 |



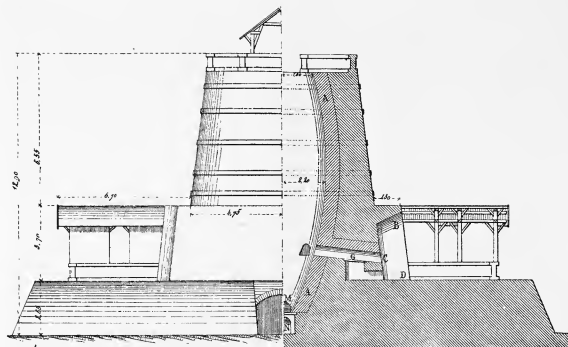


Fig. 1. Elevation et coupe suivant a b.

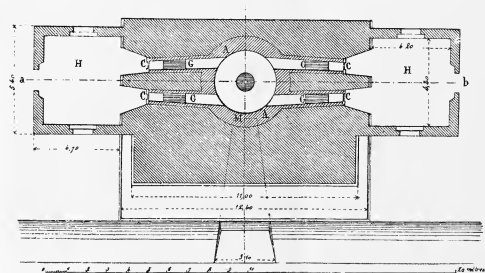


Fig. 2. Coupe horizontale.

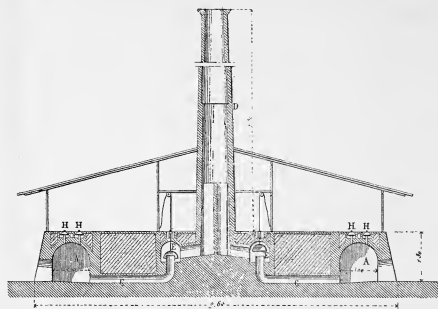


Fig. 3. Coupe suivant a b.

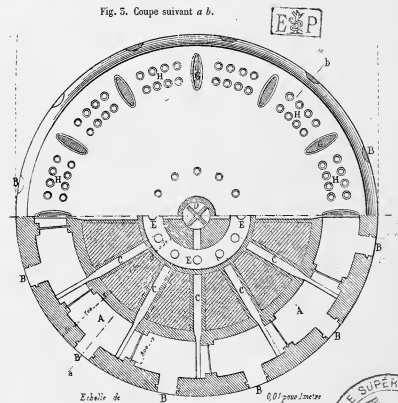


Fig. 4. Plan et coupe horizontale.



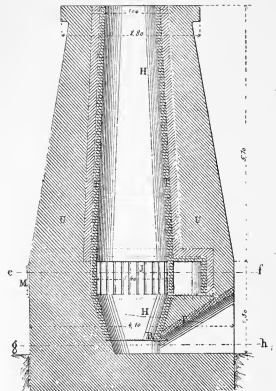


Fig. 1. Coupe suivant a b.

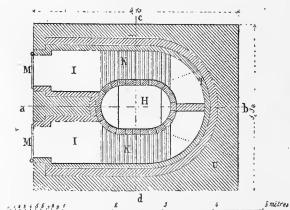


Fig. 2. Coupe suivant c f.

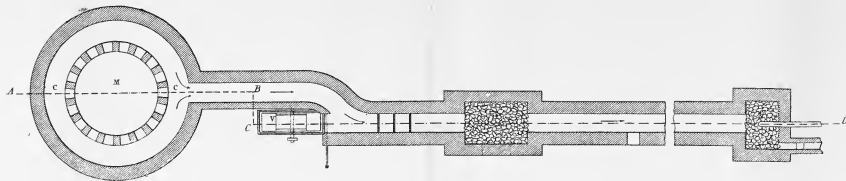


Fig. 3. Coupe suivant E F G H I K.

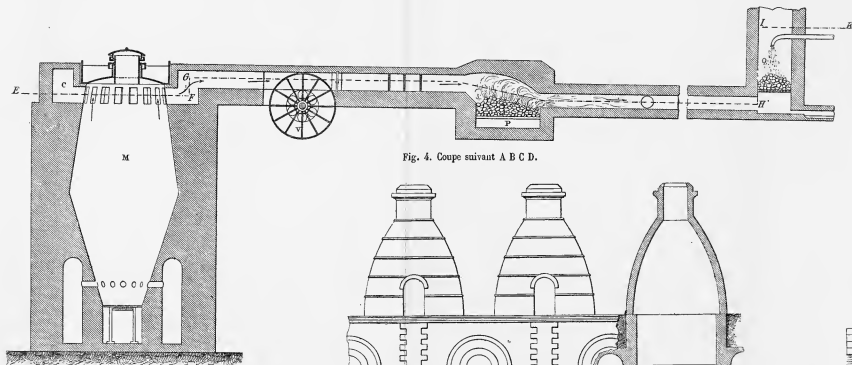


Fig. 4. Coupe suivant A B C D.

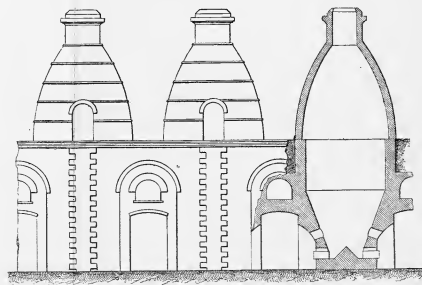


Fig. 5. Elévation et coupe verticale.

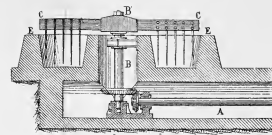


Fig. 6. Coupe transversale.

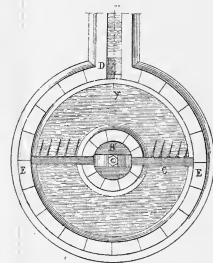


Fig. 7. Plan.

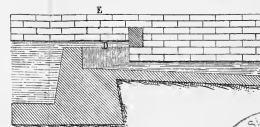
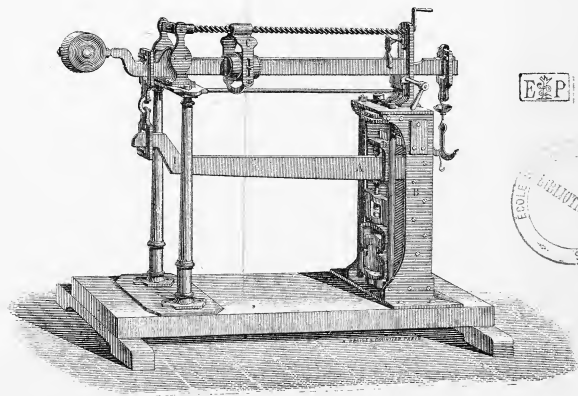
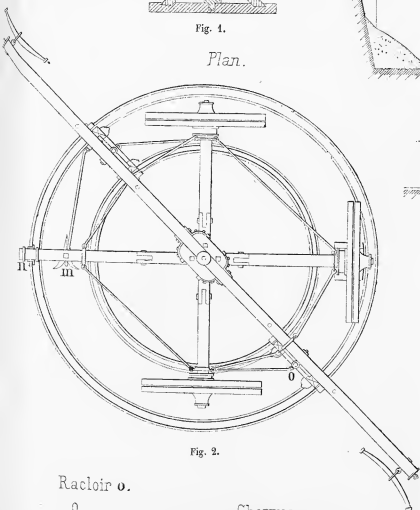
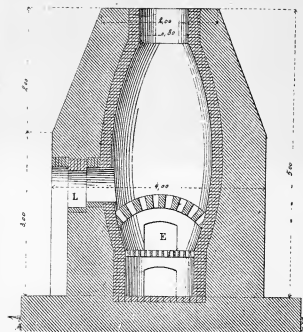
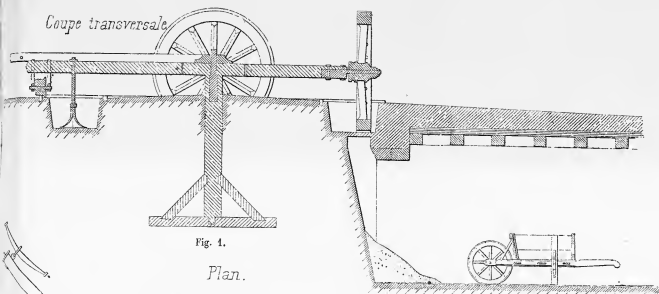


Fig. 8. Coupe suivant x y.





E. P.

